

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ

Н.А. Топчило

**ОБРАБОТКА СОЛНЕЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ
НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021**

Рецензенты: кандидат физ.-мат. наук, с.н.с. Н.Г. Петерова
(СПб филиал САО РАН)

кандидат физ.-мат. наук, доцент В.Г. Нагнибеда
(СПбГУ)

Печатается по постановлению

*Учебно-методической комиссии по укрупненной группе
направлений и специальностей 03.00.00 "Физика и астрономия"*

Топчило Н.А.

Обработка солнечных наблюдений на радиотелескопе
РАТАН-600. I. Стандартные методики: Учебное пособие
– СПб, 2021. – 71 с.

В книге дано описание РАТАН-600 – крупнейшего в мире радиотелескопа сантиметрового диапазона длин волн, представлены его характеристики, аппаратура и методы наблюдения, применяющиеся в наблюдениях Солнца. Рассмотрены характеристики основных структур солнечной атмосферы, доступные для наблюдения на РАТАН-600, и механизмы их радиоизлучения. Дается описание экспериментальных методов их измерения.

Приведено подробное описание лабораторной работы по измерению параметров солнечных активных областей: порядок выполнения работы, используемое программное обеспечение и форма отчетности.

Пособие рассчитано на студентов, обучающихся по специальности "Астрономия". Пособие может быть использовано также студентами, обучающимися по направлению "Радиофизика", а также быть полезным специалистам, начинающим работать с данными солнечных наблюдений на РАТАН-600.

© Н.А.Топчило, 2021

© С.-Петербургский гос. университет, 2021

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| Глава 1. Радиотелескоп РАТАН-600..... | 4 |
| 1.1 Основные характеристики радиотелескопа в режиме солнечных наблюдений..... | 5 |
| 1.2 Характеристики приемной аппаратуры..... | 6 |
| 1.3 Методика наблюдений и первичные данные | 7 |
| Глава 2. Радиоизлучение Солнца..... | 9 |
| 2.1 Строение атмосферы Солнца | 9 |
| 2.2 Тепловое тормозное излучение..... | 20 |
| 2.3 Циклотронное излучение..... | 21 |
| 2.4 Радиоизлучение солнечной активной области на РАТАН- 600 | 28 |
| Глава 3. Измерение характеристик солнечных активных областей. I. Стандартные процедуры. (Лабораторная работа)..... | 32 |
| 3.1 Цели и задачи работы | 32 |
| 3.2 Наблюдательный материал | 32 |
| 3.3 Программное обеспечение..... | 33 |
| 3.3.1 Инсталляция программы WorkScan | 33 |
| 3.3.2 Программа FitsView..... | 34 |
| 3.4 Обработка наблюдений в программе WorkScan | 38 |
| 3.4.1 Предподготовка РАТАНовских fits-файлов..... | 40 |
| 3.4.2 Центровка сканов и идентификация источников | 42 |
| 3.4.3 Калибровка и выравнивание уровней | 47 |
| 3.4.4 Выделение активной области | 51 |
| 3.4.5 Разделение активной области на отдельные источники и измерение их параметров (гаусс- анализ)..... | 55 |
| 3.5 Форма отчетности по лабораторной работе..... | 62 |
| Литература..... | 70 |

Введение

Для исследования астрономических источников в радиодиапазоне в зависимости от типа источника, длины волны и круга решаемых задач могут использоваться радиотелескопы самых разнообразных типов и размеров. Также у них может существенно различаться приемная аппаратура и методы обработки регистрируемой информации.

Для Солнца, как и для исследования других источников, имеется своя специфика, которая рассматривается здесь на примере РАТАН-600.

В книге дано описание РАТАН-600 – крупнейшего в мире радиотелескопа сантиметрового диапазона длин волн, представлены его характеристики, аппаратура и методы наблюдения, применяющиеся в наблюдениях Солнца. Рассмотрены характеристики основных объектов солнечной атмосферы, доступные для наблюдения на РАТАН-600, и механизмы их радиоизлучения. Дается описание экспериментальных методов их измерения.

Приведено подробное описание лабораторной работы по измерению параметров солнечных активных областей: порядок выполнения работы, используемое программное обеспечение и форма отчетности.

Работа выполняется с помощью стандартного программного обеспечения РАТАН-600 по штатной методике. Более продвинутые методики, в том числе с использованием стороннего программного обеспечения, будут описаны во второй части пособия.

Глава 1. Радиотелескоп РАТАН-600

Радиотелескоп РАТАН-600 представляет собой крупнейший радиотелескоп со сплошной апертурой в сантиметровом диапазоне длин волн. Основная антенна радиотелескопа РАТАН-600 представляет собой круг диаметром 576 метров, состоящий из 895 элементов размером 2 x 11.4 метров каждый (см. рисунок на обложке). Антенна состоит из четырех независимых секторов (по 225 элементов в каждом): Северный, Южный, Западный и Восточный, из которых три

могут одновременно использованы по трем разным программам. В фокусе антенны устанавливаются подвижные кабины с вторичными зеркалами и приемной аппаратурой.

Технический рабочий диапазон волн: 1-50 см. (610 МГц – 30 ГГц).

Точность определения координат: 1-10".

Более подробные данные о характеристиках телескопа можно найти в (Хайкин и др, 1972), (Опейкина и др, 2020, 2015) и на сайте Санкт-Петербургского филиала САО РАН: <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>.

1.1 Основные характеристики радиотелескопа в режиме солнечных наблюдений

Для регулярных наблюдений Солнца на РАТАН-600 используется Южный сектор с Плоским отражателем, которые формируют перископическую систему (систему Крауса) (Рис. 1.1). Передвижение вторичного зеркала (облучателя) по дуговым рельсам позволяет проводить наблюдения в режиме квазисопровождения источника в течение 4-х часов, а также делает возможным синтез двумерных изображений Солнца в периоды летнего и зимнего солнцестояния. Наблюдения Солнца на РАТАН-600 проводятся вблизи местного полудня – 9:00 UT (± 2 часа).

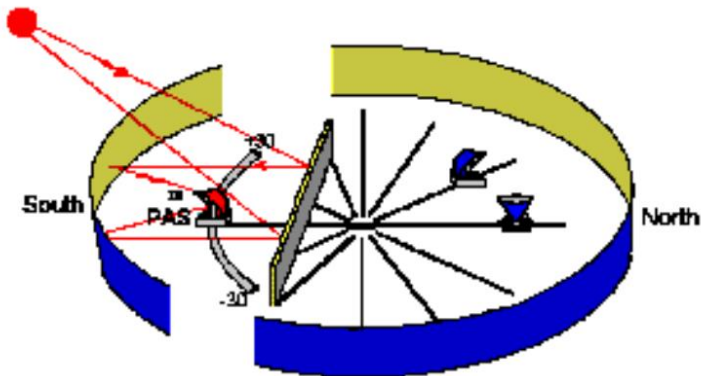


Рис. 1.1. Схематичный вид антенны радиотелескопа РАТАН-600 и методики наблюдений Солнца на Южном секторе с перископом.

Диаграмма направленности РАТАН-600 в режиме ЮГ+Перископ является “ножевой” (вид апертуры телескопа представляет собой

сильно вытянутый прямоугольник). Зависимость размеров диаграммы направленности по уровню половинной мощности от длины волны примерно составляет:

$$\Theta_{\text{horiz}}(\text{arcsec}) = 0.85 * \lambda(\text{mm}), \Theta_{\text{vert}}(\text{arcmin}) = 0.75 * \lambda(\text{mm}).$$

Соотношение размеров диаграммы по горизонтали к размеру по вертикали составляет 1 к 53.

Более точные значения диаграммы определяются по результатам специальных измерений. В отдельных случаях, когда число используемых щитов меняется, изменяется и размер диаграммы.

Форма же диаграммы зависит не только от геометрических размеров главного зеркала, но и от конструкции вторичного зеркала и облучателей. Так если облучатель вынесен из фокуса (как это было в 2005-2007 гг.), то диаграмма становится асимметричной и сильно вырастает один из боковых лепестков, что сильно усложняет обработку наблюдений. В остальные годы облучатель располагался в фокусе и для этих лет диаграмму направленности можно считать симметричной. Более того, при обработке в первом приближении можно полагать, что диаграмма имеет форму двумерной гауссианы с разными размерами в горизонтально и вертикальном направлениях.

1.2 Характеристики приемной аппаратуры

Наблюдения радиоизлучения Солнца на РАТАН-600 начались в 1975 г. и проводятся непрерывно до настоящего времени (Рис. 1.2.)

Сначала наблюдения выполнялись на 5 фиксированных длинах волн сантиметрового диапазона (2.0 см, 2.3 см, 2.7 см, 3.2 см и 4.0 см), потом на 9 волнах с подключением дециметрового диапазона (дополнительно 6 см, 13 см, 20 см, 30 см). Начиная с 1991 г. наблюдения стали, практически, всеволновыми с более полным перекрытием по диапазону от 1.7 см до 31.6 см. Многоволновые комплексы несколько раз модернизировались с целью улучшения. Последний вариант вступил в строй в 2016 г.

Новый спектрально-поляризационный комплекс высокого разрешения (СПКВР) обеспечивает 1% частотное разрешение (100 МГц) в частотном диапазоне (3.0 ГГц – 18.0 ГГц) в сочетании широкополосными (1500 МГц) каналами с регистрацией в правой (R) и левой (L) круговых поляризациях. Всего имеется 80x2 узкополосных + 10x2 широкополосных канала. Регистрация спектральных каналов

происходит в параллельном режиме с дискретностью 0.2 сек. Шумовая температура составляет ~ 300 К.

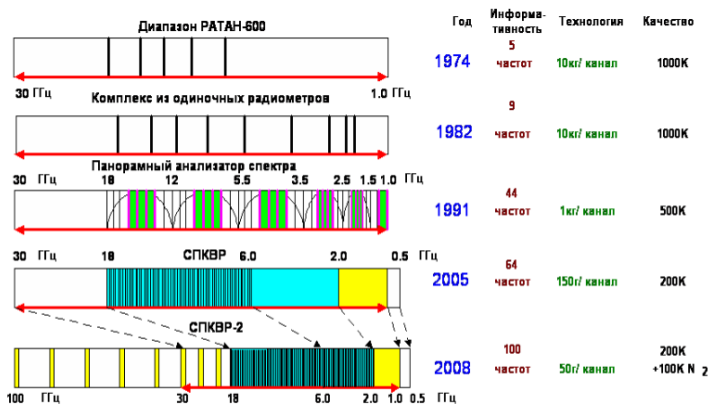


Рис. 1.2. История совершенствования солнечной приемной аппаратуры РАТАН-600.

Параллельно регистрируется также излучение в низкочастотном, дециметровом диапазоне 0.75-3.0 ГГц. Однако, из-за наличия мощных искусственных помех, записи в нем сильно искажены и в лабораторных работах они не используются.

1.3 Методика наблюдений и первичные данные

Основная методика солнечных наблюдений на Южном секторе с Перископом заключается в регистрации прохождения Солнца через неподвижную ножевую диаграмму антенны. Положение диаграммы определяется положением вторичного зеркала (см. Рис.1.3). Длительность прохождения определяется скоростью прохождения диска Солнца за счет вращения Земли (примерно 2 минуты времени) плюс время на прохождение лепестков диаграммы с обеих сторон от диска Солнца для измерения фоновго уровня (уровень сигнала от пустого неба) и проведения калибровки приемников по генератору шума. Далее производится перестановка вторичного зеркала в новый азимут. Шаг между наблюдениями составляет примерно 9 минут.



Рис. 1.3. Положение вторичного зеркала при наблюдении в одном из азимутов.

В выполняемой лабораторной работе используются только наблюдения в кульминацию. Это облегчает отождествление источников и измерение их координат, поскольку в кульминацию нож диаграммы направленности перпендикулярен направлению движения Солнца. Для других азимутов он наклонен относительно направления сканирования в ту ли другую сторону.

Все данные, полученные в каждом азимуте записываются в отдельный файл, имеющий структуру стандартного фитс-файла с расширениями. Наблюдения с 1997 г. по текущее время сохраняются в архиве по адресу <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/> и доступны для свободного скачивания.

Имена файлов имеют вид YYYYMMDD_NHMMSS_AZ_out.fits, где YYYY – год наблюдения, MM – месяц, DD – день, HH – час, MM – минута, SS – секунда. Время относится к моменту прохождения центра Солнца через центр диаграммы, время московское. AZ – азимут наблюдения, в формате: +NN, +N, +0, -N, -NN в зависимости от величины азимута.

На CD-дисках имеются также более ранние наблюдения, но они содержат наблюдения на небольшом числе частот, записаны в старых, нестандартных форматах и для использования требуют конвертацию в fits-формат.

Глава 2. Радиоизлучение Солнца

Прежде всего, перед началом обработки наблюдений необходимо определить, какие объекты на диске Солнца доступны для наблюдения на рассматриваемом телескопе и какие их параметры могут быть измерены в результате проведения обработки.

Поскольку в течение последних десятилетий Солнце активно наблюдалось, как с поверхности Земли, так и из космоса, то мы неплохо представляем как оно выглядит во всех диапазонах и можно считать, что сейчас, в целом, мы имеем достаточно адекватное представление о его строении и физических процессах, происходящих на нем. Тем не менее, некоторые принципиальные вопросы и точные численные характеристики еще остаются предметом дискуссий и требуют дальнейших наблюдательных обоснований. Для этого продолжают строить новые инструменты с улучшенными характеристиками и модернизировать старые, а также совершенствовать методы обработки наблюдений.

Ниже, конспективно представлены эти вопросы, более подробно изложенные в многочисленных учебниках и справочниках, например: (Железняков, 1997; Краус, 1973; Крюгер, 1984; Христиансен и Хёгбом, 1988; Aschwanden, 2005, 2019; Gary and Keller, 2005; Fleishman and Toptygin, 2013).

2.1 Строение атмосферы Солнца

1. Усредненная атмосфера:

Модели усредненной (однородной по поверхности, слоистой) атмосферы активно разрабатывались в 80-е годы на основе измерения оптических линий. Основные их характеристики:

1. непрерывное, резкое уменьшение плотности с высотой;
2. уменьшение температуры от фотосферных 6000K до 4000K на высоте ~500 км (температурный минимум), умеренный рост до 8000K до высоты ~2000 км (нижняя-средняя хромосфера) и резкий рост до

корональных температур к высоте ~3000 км (верхняя хромосфера – переходной слой) (см. Рис. 2.1.1).

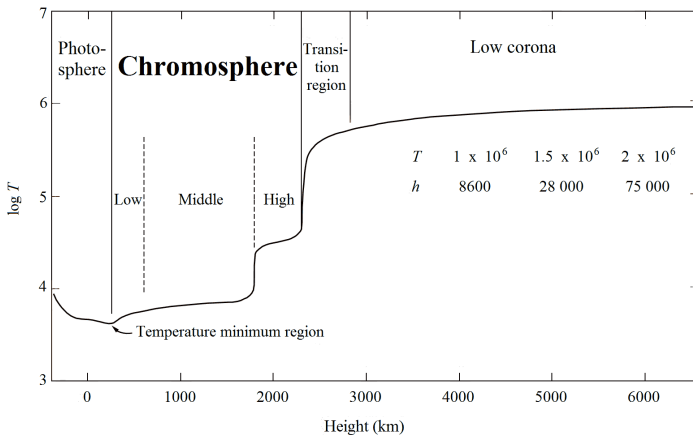


Рис. 2.1.1. Высотное распределение температуры в атмосфере Солнца.

Такие модели в целом соответствуют наблюдаемой зависимости яркостной температуры от длины волны для спокойного Солнца (Рис.2.1.2).

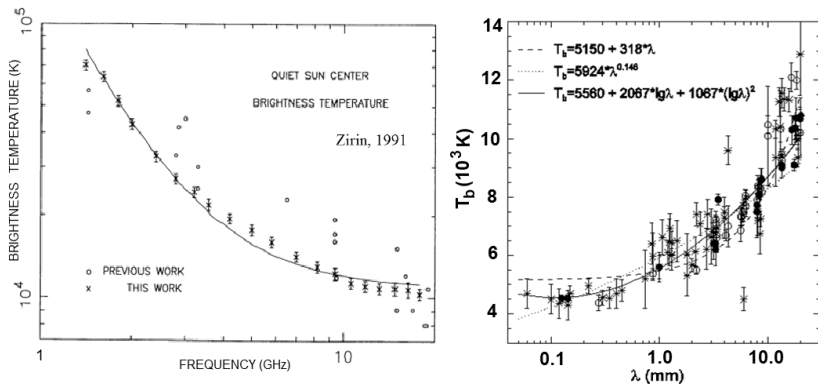


Рис. 2.1.2. Спектр яркостной температуры Солнца в микроволновом диапазоне (слева) и в мм и субмм диапазоне (справа).

Увеличение яркостной температуры с длиной волны является закономерным результатом увеличения коэффициента поглощения в радиодиапазоне с длиной волны => растет оптическая толщина => эффективный излучающий слой поднимается выше в более нагретые слои (Рис. 2.1.3).

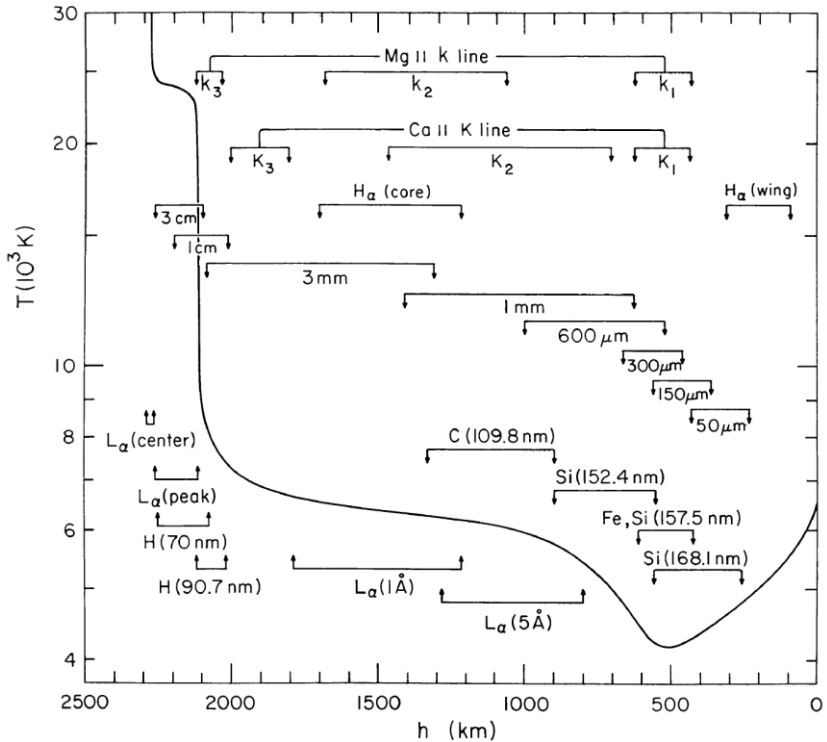


Рис. 2.1.3. Уровни образования различных излучений в атмосфере Солнца.

2. Неоднородная атмосфера:

В действительности атмосфера Солнца существенно неоднородна (Рис. 2.1.4). Это обнаруживается как в реальных наблюдениях (Рис. 2.1.7-2.1.15), так и в численных симуляциях (Рис. 2.1.6), и касается как спокойного Солнца, так и разнообразных источников, видимых в солнечной атмосфере.

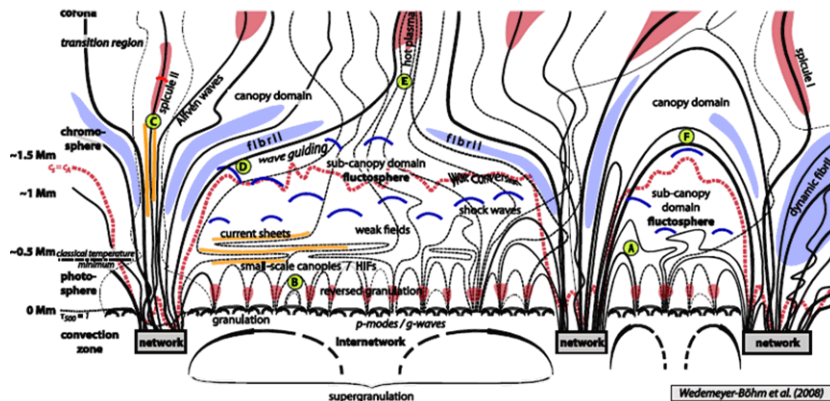


Рис. 2.1.4. Схема неоднородностей “спокойной” солнечной атмосферы.

Размеры неоднородностей могут варьироваться на несколько порядков от десятков километров (яркие точки в межгранульном пространстве) до сотен тысяч километров (протуберанцы, петли между удаленными активными областями и т.п.). Они видны в разных частотных диапазонах на инструментах разного типа. Часто они исследуются как отдельные обособленные физические образования, хотя, безусловно, их надо рассматривать в комплексе с окружающей активностью, как неотделимая часть солнечной атмосферы. Поэтому, каждый участок солнечной атмосферы обладает своими специфическими характеристиками и применение понятия “среднего” к атмосфере Солнца достаточно условно.

Далее приведены характерные примеры объектов/структур солнечной атмосферы и как они выглядят в разных частотных диапазонах. Из примеров исключены вспышки и быстрые активные процессы, которые в силу специфики работы РАТАН-600 не могут эффективно наблюдаться.

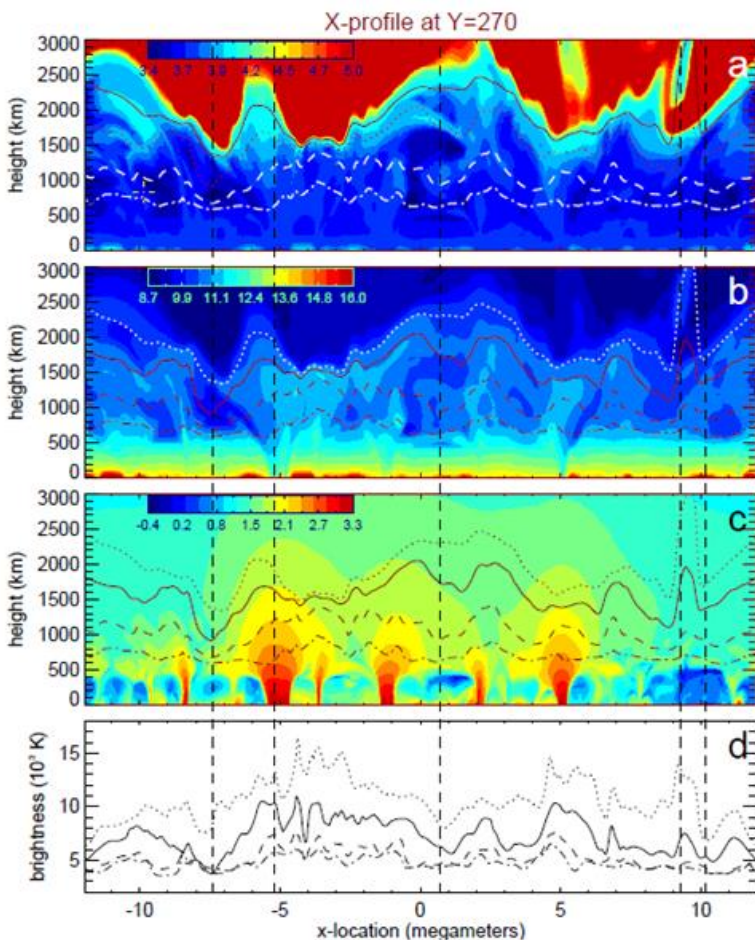


Рис. 2.1.5. Пример численного расчета 3D моделирования неоднородной солнечной атмосферы. Высотные сечения температуры (a), плотности (b) и магнитного поля (c). (d) – распределение яркостных температур на волнах 0.4, 1.0, 3.6 мм (жирная линия) и 10 мм.

Характерные мелкомасштабные, структурные детали изображения солнечной поверхности – округлые, плоскостные и сильно вытянутые, петлеобразные (Рис. 2.1.6-2.1.7):

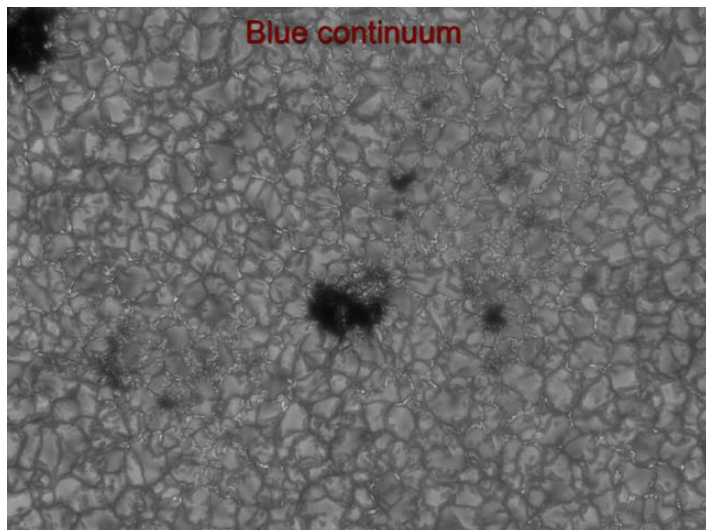


Рис. 2.1.6. Фотосферная грануляция.

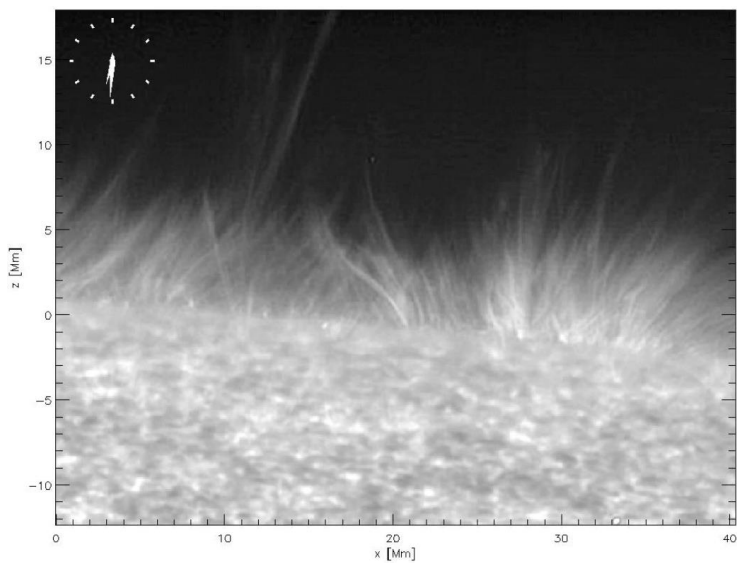


Рис. 2.1.7. Спикулы (Ca II H).

3. Крупномасштабные структуры:

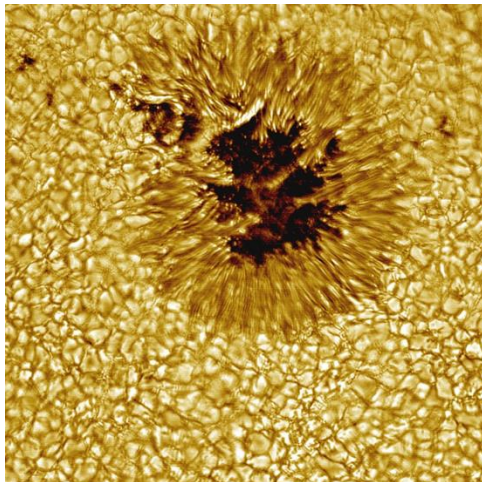


Рис. 2.1.8. Солнечное пятно (белый свет, видна тонкая структура).

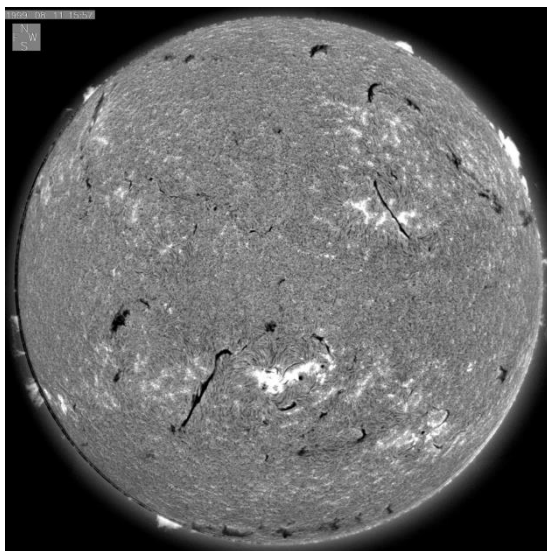


Рис. 2.1.9. Активные области, волокна, протуберанцы (в H-alpha).

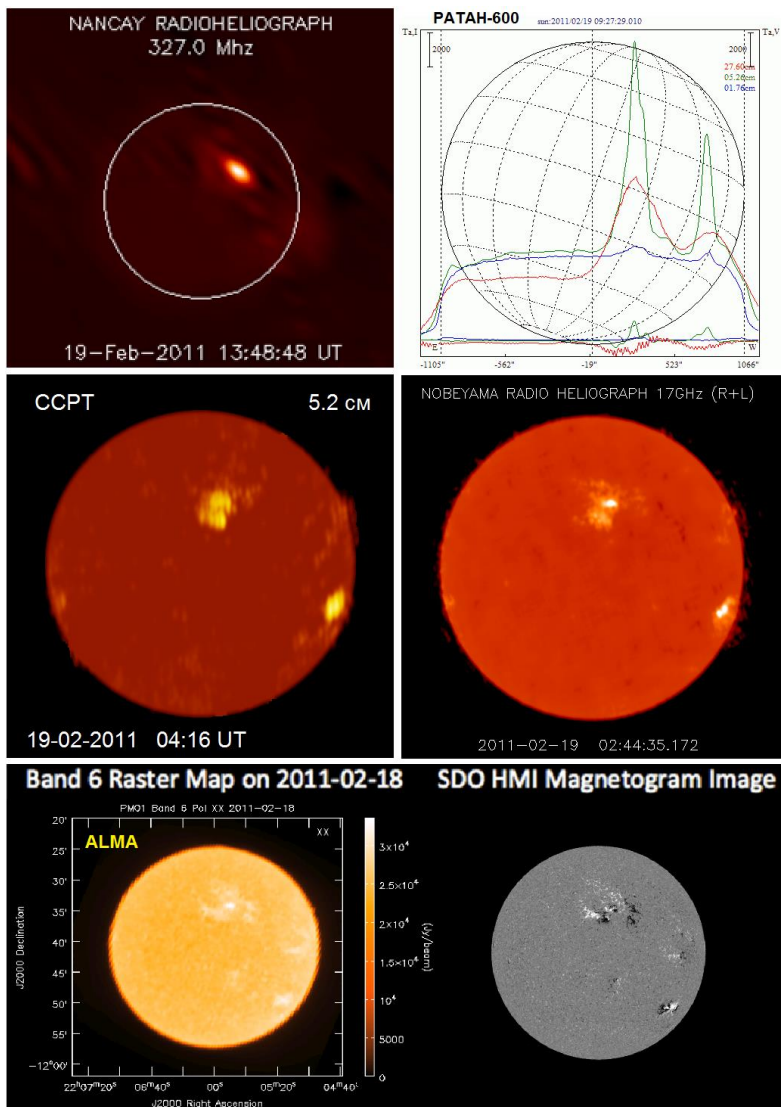


Рис. 2.1.10. Квазисинхронные изображения Солнца, полученные с высоким разрешением 18-19.02.2011 в широком диапазоне длин волн: 92 см (Nancay RH), 27.6, 5.26, 1.76 см (PATAH-600), 5.2 см (CCPT), 1.7 см (NoRH), 1.09-1.42 мм (ALMA) и распределение магнитного поля по данным SDO/HMI.

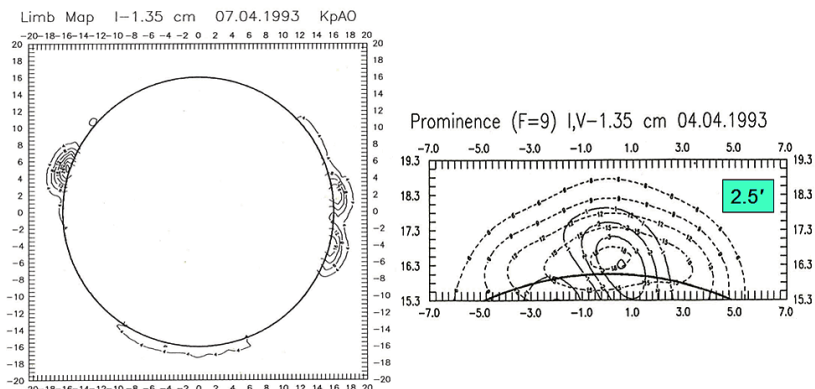


Рис. 2.1.11. Изображение лимба Солнца с протуберанцами на 1.35 см (РТ-22 КрАО). Разрешение 2.5'.

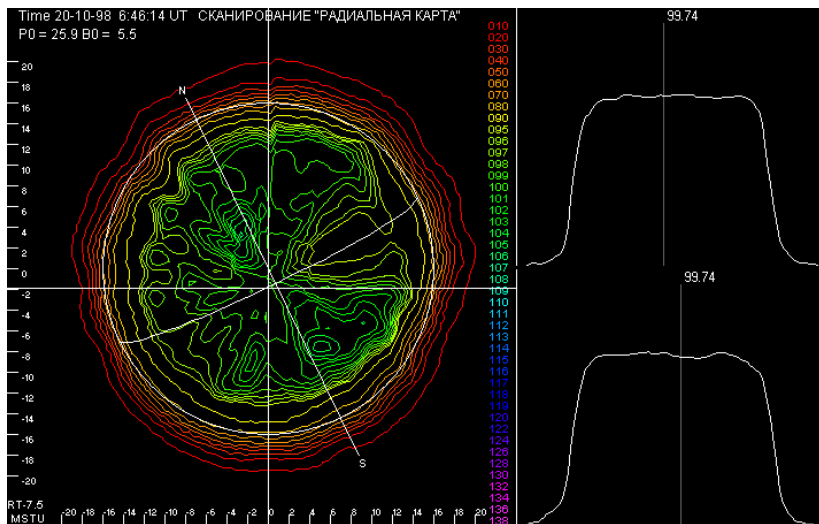
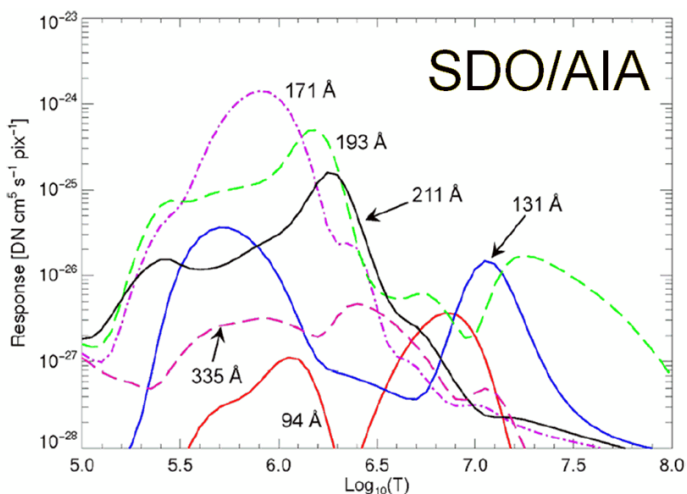


Рис. 2.1.12. Карта Солнца, полученная на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ. (разрешение 1,6' на волне 2,2 мм и 2,4' на волне 3,2 мм).



| Channel | Primary ion(s) | Region of atmosphere | Char. log(<i>T</i>) |
|---------|----------------|---------------------------------------|-----------------------|
| 4500 Å | continuum | photosphere | 3.7 |
| 1700 Å | continuum | temperature minimum, photosphere | 3.7 |
| 304 Å | He II | chromosphere, transition region | 4.7 |
| 1600 Å | C IV + cont. | transition region, upper photosphere | 5.0 |
| 171 Å | Fe IX | quiet corona, upper transition region | 5.8 |
| 193 Å | Fe XII, XXIV | corona and hot flare plasma | 6.2, 7.3 |
| 211 Å | Fe XIV | active-region corona | 6.3 |
| 335 Å | Fe XVI | active-region corona | 6.4 |
| 94 Å | Fe XVIII | flaring corona | 6.8 |
| 131 Å | Fe VIII, XXI | transition region, flaring corona | 5.6, 7.0 |

Рис. 2.1.13. Температурная зависимость излучения солнечной плазмы для UV и EUV каналов SDO/AIA и характерные области его возникновения.

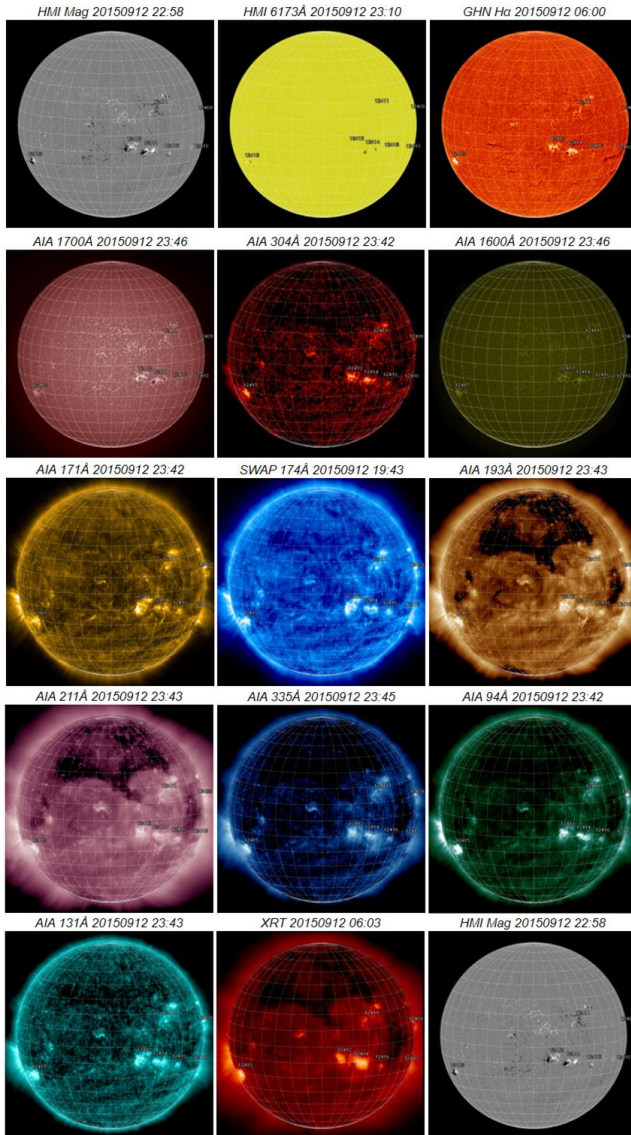


Рис. 2.1.14. Сопоставление синхронных изображений Солнца на SDO (AIA+HMI), в H α (GHN) и рентгене (XRT).

Рассматривая приведенные выше изображения, легко увидеть, что почти все видимые структуры (кроме чистой грануляции) возникают и формируются благодаря присутствию магнитного поля.

И в принципе, при достижении соответствующего углового разрешения мы должны видеть в радиодиапазоне все объекты и структуры. Но как они будут выглядеть, зависит от преобладающего типа излучения.

И еще надо иметь ввиду, что при недостаточном угловом разрешении все тонкие детали будут замываться, что может существенно исказить результаты интерпретации наблюдений.

2.2 Тепловое тормозное излучение

Тепловое тормозное излучение присутствует повсеместно в спокойной астрофизической плазме с достаточной плотностью и умеренной температурой. Его достаточно легко определить по характеру спектра. Во-первых: спектр излучения непрерывный, во-вторых: поток излучения $F(\lambda)$ от источника в отсутствии магнитного поля имеет вид (τ_l - оптическая толщина на волне l см):

$$F(\lambda) = \frac{2k \cdot \Omega}{\lambda^2} \cdot \int_0^\infty T_e(y) \cdot e^{-\tau(y)} dy = \frac{2k \cdot \Omega}{\lambda^2} \cdot \int_0^\infty T_e(y) \cdot e^{-\tau_1(y) \lambda^2} dy,$$

$$\text{где } \tau_\lambda(y) = \int_0^y c \frac{n_e^2(y')}{T^{3/2}(y')} \lambda^2 dy' = \lambda^2 \tau_1(y).$$

Тогда очевидно, что $\partial F(\lambda) / \partial \lambda \leq 0$

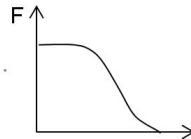


Рис. 2.2.1. Вид спектра теплового тормозного излучения.

т.е. поток не может возрастать при увеличении длины волны. Излучение не поляризовано.

При наличии же магнитного поля коэффициенты поглощения (и соответственно оптические толщины) для разных поляризаций различаются:

$$\chi_{o,e} = \frac{e^2 N_e \nu_{ст.}}{c \pi m} \cdot \frac{1}{n_{o,e}} \cdot \frac{1}{(f \pm f_H)^2}$$

где f_H – гирочастота. Оптическая толщина в необыкновенной волне (индекс e , знак минус в формуле) становится больше, чем в отсутствии магнитного поля, а в обыкновенной волне (индекс o , знак плюс в формуле) меньше, и для оптически тонкого слоя или при наличии градиента температуры для оптически толстого слоя излучение становится поляризованным. При этом в слабом однородном магнитном поле яркостная температура в модах будет соответствовать яркостной температуре такого же слоя без магнитного поля сдвинутой на величину гирочастоты в одну или другую сторону (Рис. 2.2.1). А полная интенсивность (или яркостная температура) не изменится.

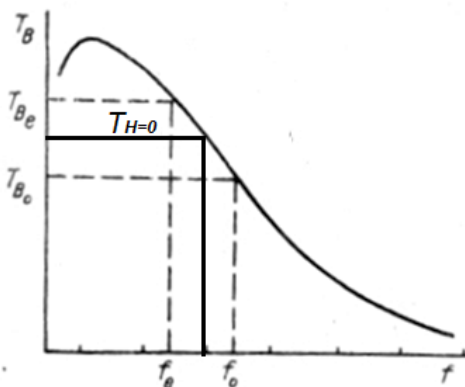


Рис. 2.2.2. Изменение яркостной температуры источника теплового тормозного излучения в присутствии магнитного поля.

2.3 Циклотронное излучение

То, что радиоизлучение активных областей не может быть описано с помощью механизма теплового тормозного излучения стало ясно сразу как только появились наблюдения в коротковолновом см диапазоне – наблюдаемые спектры имели максимум в районе ~ 5 см.

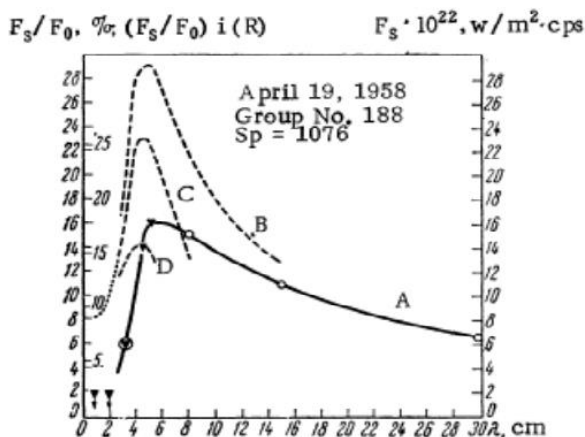


Рис. 2.3.1. Одни из первых циклотронных спектров активной области.

Для их описания очень удобным оказался циклотронный механизм излучения. По своей природе он линейчатый и для условий солнечной атмосферы ширина линии мала ($\beta_T \ll 1$). Т.е. комбинируя на луче зрения области с разной величиной магнитного поля можно получить самые разнообразные спектры. Конечно, произвольно комбинировать нельзя, магнитное поле наряду с остальными параметрами должно удовлетворять уравнениям магнитной гидродинамики. Но степень свободы у циклотронного механизма значительно больше чем у теплового тормозного.

$$f_s = s \cdot f_B$$

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \beta_T \cdot \cos(\alpha)$$

$$\beta_T = \frac{v_T}{c}$$

$$f = \frac{qH}{2\pi mc}$$

$$\beta_T \approx 10^{-2} \quad \text{для короны}$$

$$\beta_T \approx 10^{-3} \quad \text{для хромосферы}$$

$$f_B = 2.81 \cdot B$$

$$f \text{ в ГГц, } B \text{ в КГс}$$

Еще одной характерной особенностью циклотронного излучения является его сильная поляризованность, вызванная значительным различием в оптических толщинах гармоник, возникающей за счет различий в зависимости от угла зрения – в обыкновенной (знак “плюс” в формуле) и необыкновенной (знак “минус” в формуле) модах:

$$\tau_{js} = \frac{s^{2s}}{2^s s!} \frac{\pi e^2}{mc^2} \beta_T^{2s-2} L_H N \lambda$$

$$\times \sin^{2s-2} \alpha \frac{(\sqrt{u} \sin^2 \alpha + 2 \cos^2 \alpha \pm \sqrt{u \sin^4 \alpha + 4 \cos^2 \alpha})^2}{u \sin^4 \alpha + 4 \cos^2 \alpha \pm \sqrt{u} \sin^2 \alpha \sqrt{u \sin^4 \alpha + 4 \cos^2 \alpha}}.$$

$$\beta_T = v_T / c \quad u = 1 / s^2$$

В целом же, для условий солнечной атмосферы при наличии достаточно сильного поля оптическая толщина по циклотронному излучению превышает оптическую толщину по тепловому тормозному излучению в см диапазоне длин волн (Рис. 2.3.2).

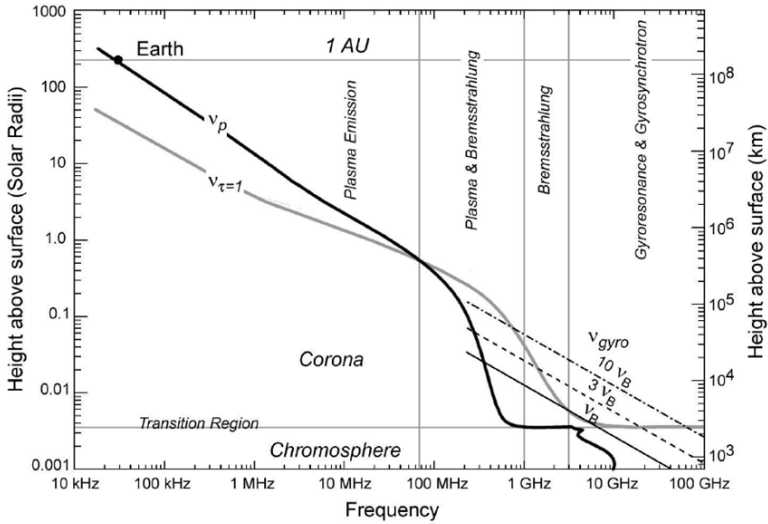


Рис. 2.3.2. Высотное распределение оптических толщин для разных механизмов излучения над солнечными пятнами.

При этом нужно учитывать, что оптическая толщина резко падает с увеличением номера гармоники: $\tau_{s+1} / \tau_s \sim (\beta_T)^2 \ll 1$ и поэтому, практически можно считать, что основной вклад в излучение в обыкновенной и необыкновенной модах дают разные гармоники. Поэтому В результате, при наличии градиента температур появляется сильная поляризация.

В реальных наблюдениях линейчатый характер циклотронного излучения не наблюдается. Это связано с тем, что на Солнце нет значительных участков с однородным магнитным полем, а интегрирование по участкам с разным магнитным полем дает сглаженные спектры.

Примером таких объектов являются солнечные пятна (Рис. 2.3.3).

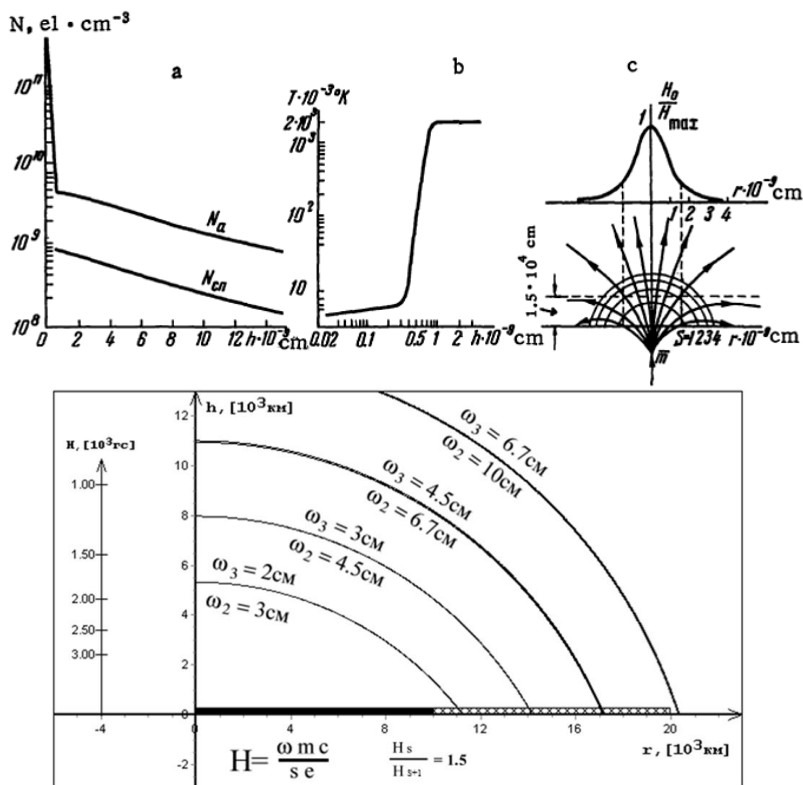


Рис. 2.3.3. Модельное распределение параметров над пятном с дипольной моделью магнитного поля. Сверху: модель атмосферы (Злотник, 1968) Внизу: положение и частоты излучения отдельных gyroуровней в обыкновенной (ω_2) и необыкновенной модах (ω_3) для наблюдений на БПР.

Измеренный в наблюдениях спектр пятен гладкий без заметных линий. А циклотронность его ярко проявляется в наличии максимума потока.

Дополнительное свидетельство наличия циклотронного механизма состоит в большой степени поляризации при достижении яркостных температур перехода от хромосферы к короне. А также при увеличении степени поляризации до $\approx 100\%$ на высоких частотах, когда магнитного поля не хватает для генерации обыкновенной моды излучения (обычно это 2-я гармоника гирочастоты), а для необыкновенной (обычно это 3-я гармоника) хватает.

Еще одно явное проявление циклотронного механизма – это тонкая структура источника излучения. Из-за сильной зависимости оптической толщины от угла между направлением вектора магнитного поля и лучом зрения вид источника сильно и главное специфическим образом зависит от угла зрения при перемещении источника по диску Солнца (Рис. 2.3.4-2.3.5).

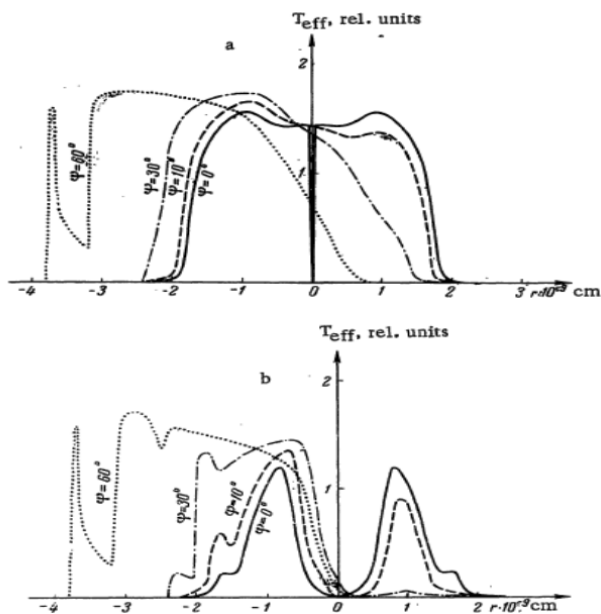


Рис. 2.3.4. Распределение яркостной температуры по круглому пятну с дипольным магнитным полем (модель из рис.2.3.1 сверху) в необыкновенной (а) и обыкновенной (б) модах при наблюдении под разными углами – сечение через центр пятна в плоскости луча зрения (Злотник, 1968).

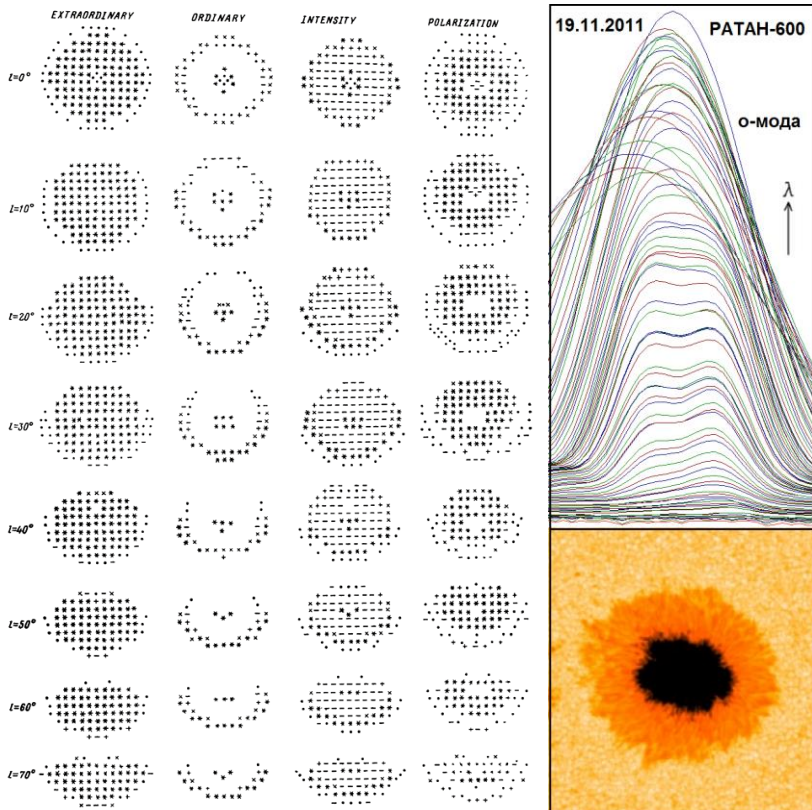


Рис. 2.3.5. Слева: та же модель, что на рис.2.3.4, но представлены двумерные изображения для обеих мод, интенсивности и поляризации (Гельфрейх и Лубышев, 1979). Справа: наблюдения пятна на ПАТАН-600 в центре диска Солнца (Петерова и Топчило, 2016).

Приведенные тонкие детали (понижения в центре пятна, серпы, кольца) зависят от реальной структуры магнитного поля и распределения других физических параметров над пятном и в его окрестности. Для их обнаружения требуется высокое пространственное разрешение секундного порядка. Но иногда, для крупных солнечных пятен свидетельства их наличия обнаруживаются в наблюдениях на ПАТАН-600 при положении пятна близко к центру диска Солнца (рис. 2.3.5) и в наблюдениях на NoRH (Рис. 2.3.6).

Такие тонкие эффекты будут рассмотрены во второй части пособия, а в данной работе мы будем оперировать пятнами как единым бесструктурным образованием.

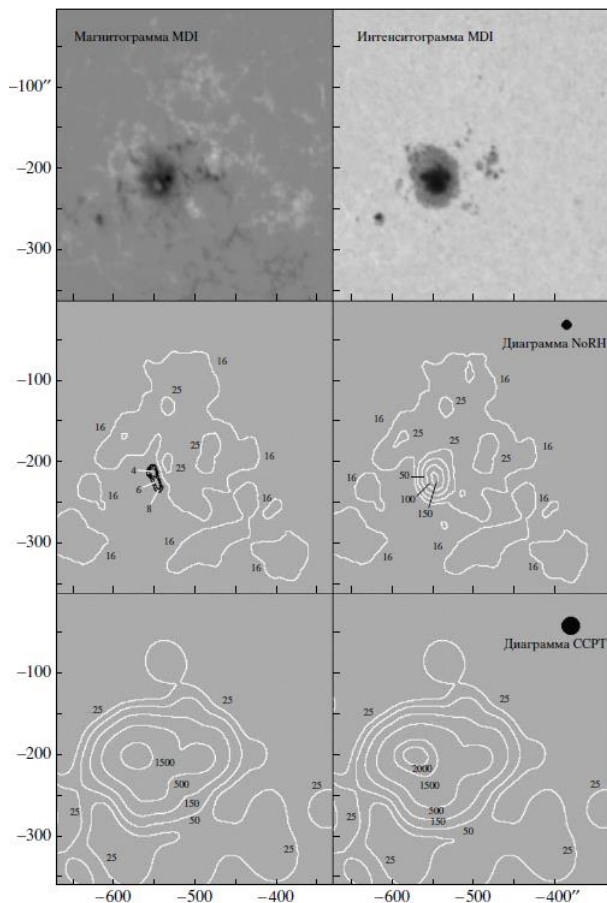


Рис. 2.3.6. АО NOAA 10105 по наблюдениям 11.09.2002 на SOHO (верхний ряд карт), NoRH (средний ряд карт) и CCRT (нижний ряд карт). Карты NoRH и CCRT представлены в *o*-моде излучения (левые карты) и *e*-мод (правые карты) излучения; значения яркостной температуры указаны в тыс. К. (Топчило и др., 2010).

2.4 Радиоизлучение солнечной активной области на РАТАН-600

Наблюдения Солнца на РАТАН-600 проводятся уже много лет и за этот период была выработана некоторая усредненная модель активной области, учитывающая ее структуру, физические характеристики и особенности ее радиоизлучения (Рис. 2.4.1).

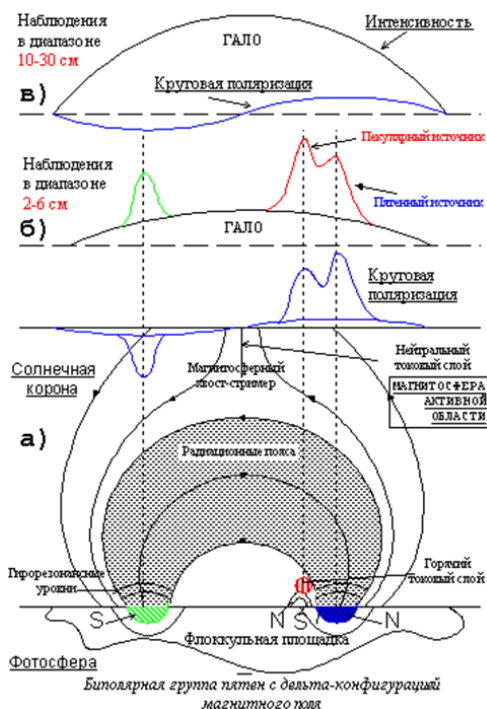


Рис. 2.4.1. Модельное представление активной области с простой биполярной структурой и вид ее излучения на радиотелескопе РАТАН-600 в разных диапазонах длин волн.

Активная область подразделяется на области сильного магнитного поля – компактные пятенные источники (хорошо сформировавшиеся пятна с тенью и полутенью) и “гало” – крупномасштабное, слабо структурированное образование, связанное с общим слабым

магнитным полем активной области – флоккула, факельной площадки (Рис. 2.4.1). На рисунке также отмечен еще один тип источников “пекулярный источник” – яркий компактный источник, связанный с выходом нового магнитного поля в пределах старой активной области. Он встречается достаточно редко, связан с активными процессами и в данной работе рассматриваться не будет.

На рисунке также представлен схематический вид источников на коротких волнах (б) и длинных волнах (в).

На коротких волнах пятенный источник виден в виде узкого, яркого образования с сильной круговой поляризацией на фоне крупномасштабного, слабополяризованного гало. На волнах короче 2 см яркий источник исчезает (магнитное поле недостаточно сильное) и остается только гало. На длинных волнах (примерно с 10 см) пятенный источник также исчезает, сливаясь с гало. Частично это связано с расширением диаграммы направленности, частично с выравниванием яркостных температур гало и пятна при выходе характерной высоты изучения в более-менее однородную корону.

Типичные спектры источников представлены ниже на рис. 2.4.2.

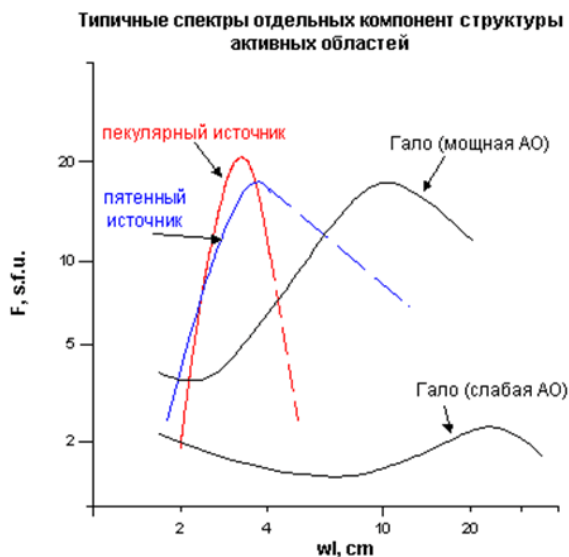


Рис. 2.4.2. Типичные спектры потока структурных компонент активной области.

Видно, что пятенный источник имеет характерный циклотронный спектр. А гало на коротких волнах показывает тепловой тормозной спектр, сменяющийся на более длинных волнах на циклотронный. Причина этого состоит в том, что кроме пятен в активной области имеются слабые рассеянные магнитные поля, которые на достаточно длинной волне также будут давать циклотронное излучение и из-за широкой диаграммы на этих волнах все сольется в единый источник. Во многих случаях также имеются отдельные места повышенного магнитного поля: магнитные поры, небольшие пятна без тени, обрывки полутени и т.п. Они могут располагаться в любом месте активной области, как в центре активной области между головным и хвостовым пятном, так и около одного из пятен (обычно около хвостового). На длинных волнах источники могут давать как общее циклотронное повышение, так и небольшие локальные источники.

В отличие от идеализированной модели, представленной на Рис. 2.4.1, очень часто хвостовые пятна бывают неправильной формы, маленькие, раздробленные или могут вообще отсутствовать.

Пример реальной обработки сложной активной области представлен ниже на Рис. 2.4.3, где кроме 3-х пятенных источников выделены два гало и два слабых источника, связанных с локальными усилениями магнитного поля. В данном примере наиболее ярко и достоверно выделяется более-менее правильное головное пятна. Хвостовые пятна и сами имеют сложную структуру и интегрированы в сложную хвостовую часть. Несмотря на то, что они наблюдаются как отдельные объекты, но их выделение вследствие специфики инструмента не является однозначным и требует тщательного сравнения с наблюдениями в других диапазонах и большого опыта.

В данной лабораторной работе такие сложные активные области рассматриваться не будут. А из имеющихся в области структур основное внимание будет уделено обработке головного пятна и гало. Остальные слабые детали выделяться и рассматриваться не будут.

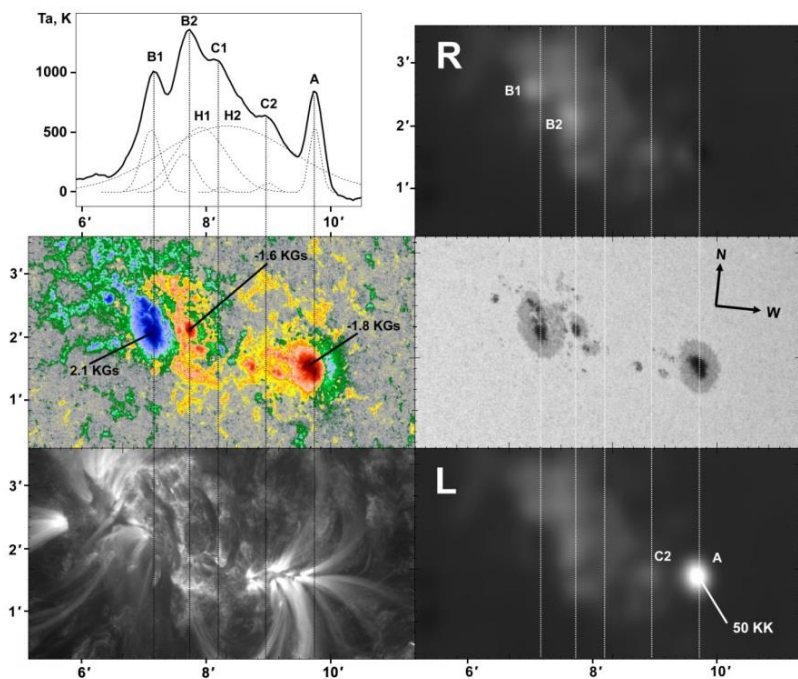


Рис. 2.4.3 Иллюстрация к обработке наблюдательного материала {РАТАН-скан на волне 3 см и NoRH-карты (R,L)}, сопоставленные с наблюдениями активной области NOAA 12371 (24.06.2015 г.) в оптическом и УФ-диапазонах. Компактные детали А, В1 и В2 ассоциируются с основными пятнами АО, Н1 и Н2 – протяженные детали типа «гало», С1 и С2 – малоконтрастные уярчения, не имеющие четкого отождествления.

Глава 3. Измерение характеристик солнечных активных областей. I. Стандартные процедуры. (Лабораторная работа)

3.1 Цели и задачи работы

Основной целью данной работы является ознакомление студентов со спецификой обработки солнечных наблюдений, проводимых на радиотелескопе РАТАН-600. В задачи работы входит выделение активной области, разделение ее на отдельные структурные компоненты (пятна и гало) и определение зависимости их физических характеристик (потока, размеров, яркостной температуры, степени поляризации излучения) от длины волны. В качестве основного объекта исследования выбраны пятна, что определяется как их ролью в качестве источника магнитного поля, так и их пространственной компактностью, которая позволяет во многих случаях отделить их излучение, от излучения крупномасштабных структур активной области.

Работа выполняется с использованием стандартного программного обеспечения РАТАН-600: программы обработки **WorkScan**.

Работа выполняется студентами-астрономами математико-механического факультета СПбГУ в рамках “Лабораторного практикума по Радиоастрономии” и “Лабораторного практикума по Физике Солнца”.

3.2 Наблюдательный материал

В качестве исходных данных используются реальные записи прохождения Солнца через диаграмму телескопа в период кульминации. Записи в виде fits-файлов берутся с сайта Санкт-Петербургского филиала CAO РАН: <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>.

Для сопоставления с изображениями Солнца в других диапазонах используются данные SDO, SOHO и д.р. инструментов или

обсерваторий в виде картинок или fits-файлов (если таковые будут совместимы с программой WorkScan). Для данных с апреля 2010 г. предпочтительно пользоваться данными SDO/HMI – белый свет (файлы вида ..._Ic_flat_4k.jpg) и магнитное поле (файлы вида ..._M_color_4k.jpg)) с сайта <http://jsoc.stanford.edu/data/hmi/images/> и данные в ультрафиолете с SDO/AIA на 1700Å с сайта <http://jsoc.stanford.edu/data/aia/images>. Картинки нужно брать на времена, максимально приближенные к наблюдениям на ПАТАН-600.

Обработка выполняется для заданной активной области для одного или нескольких выбранных преподавателем дней наблюдений на всех волнах короче 10 см (более длинные волны искажены помехами).

3.3 Программное обеспечение

Для обработки используются несколько программ:

1. WorkScan – основная программа обработки, выполняющая непосредственно обработку ПАТАНовских fits-файлов;
2. FitsView – служебная программа, выполняющая преобразование графических файлов (gif-формат, 8 битный) в fits-файлы;
3. IrfanView – служебная программа, конвертирующая графические файлы в требуемый gif-формат (можно использовать любую аналогичную программу);
4. Coolrule – экранная линейка, используется при обработке для ручного определения смещения источника по вертикали (можно использовать любую экранную линейку).

Программы работают в среде Windows, но с большой долей вероятности будут работать и в Linux, в эмуляторе. При работе в компьютерном классе эти программы уже установлены на компьютерах. На личном компьютере их придется устанавливать самим. Все программы бесплатные.

3.3.1 Установка программы WorkScan

Ссылка на установочные файлы программы находится на сайте <http://www.spbf.sao.ru/prognoz> в разделе **Программное обеспечение**. Там же расположены ссылки на инструкции и дополнительные материалы по программному обеспечению ПАТАН-600.

Для установки программы надо скачать и запустить файл **Setup.exe** (на момент написания пособия файл находился в корне папки <http://www.spbf.sao.ru/data/utls/WS-new/>) При этом в папке **Program**

Files создается папка **Workscan** с набором рабочих папок внутри. Таким образом, устанавливается базовый вариант программы.

Для замены базовой программы на более поздние версии надо переписать с заменой в папку **Workscan** два обновленных файла: **Scanwrk.exe** (собственно исполняемый файл программы) и **scanwrc.crc** (контрольная сумма к нему), которые располагаются по указанному выше адресу с папках с именем-датой. Чем позже дата, тем более новый в нем содержится файл. Последняя, доступная версия датирована 16 апреля 2013 г. В папках также могут находиться обновленные служебные файлы.

В разделе **Программное обеспечение** имеется также ссылка на **Онлайн help к WorkScan** и историю изменений программы. В последний раз он находился по адресу:

<https://docs.google.com/document/d/1J28k82hhDpihq9ZHwytv5fAk2kwZZslgoqC3bK41vBk/pub>.

С данным документом полезно ознакомиться, поскольку он содержит некоторые вопросы, не включенные в данное пособие. В пособии в следующих параграфах будут подробно рассматриваться только вопросы, непосредственно связанные с используемой процедурой обработки и интерпретации измерений параметров активных областей. Изложение будет вестись в последовательности, соответствующей нормальной последовательности процедур обработки. Процедуры, не используемые в процессе обработки и соответствующие им пункты меню рассматриваться не будут. При желании их описание можно найти в **Онлайн help к WorkScan**.

Замечание. Процедуру установки делать не обязательно! Если на каком либо компьютере стоит работающий вариант программы, то можно просто с него перенести всю папку **WorkScan** целиком на новый компьютер и все будет работать. Единственное, возможно придется переписать пути в параметрах настройки (см. далее в параграфе 3.4), если новое место установки отличается от старого.

3.3.2 Программа FitsView

Программа **FitsView** (исполняемый файл программы – **FitsView.exe**) устанавливается автоматически в корень папки **WorkScan** и работает независимо от основной программы. Она предназначена для преобразования графических файлов карт Солнца (gif-формат, 8 битный) в fits-файлы, которые будут загружаться в программу **WorkScan** для сопоставления с ПАТАНовскими сканами. Кроме fits-файла программа формирует дополнительно файл с

палитрой изображения, которое преобразовывалось. Если изображение не цветное, то выдается серая палитра.



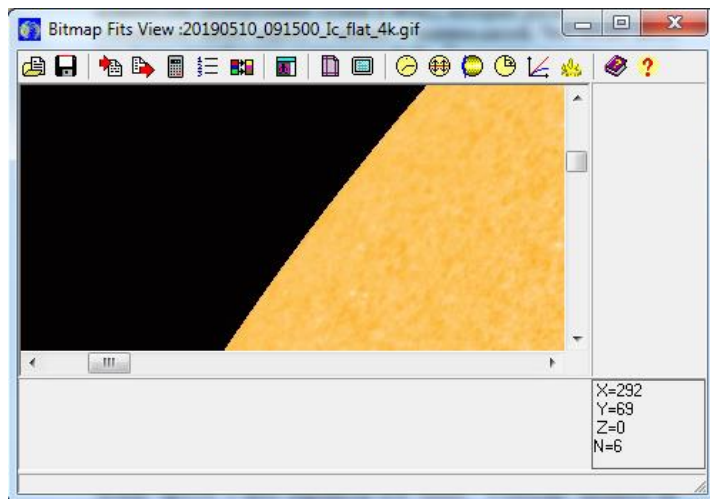
Рис. 3.3.1. Панель инструментов программы Fits View.

Порядок выполнения и используемые кнопки:

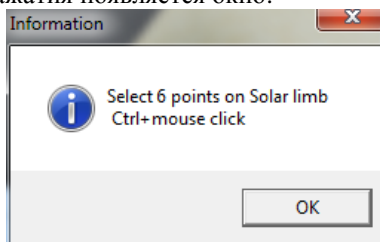
1. **загружает** входную картинку с расширением gif;
2. **вычисляет** положение центра Солнца на картинке и его радиус в пикселях;
3. создает по картинке **fits-файл**;
4. сохраняет палитру загруженной картинки в файл типа **pal**.

Особенности выполнения:

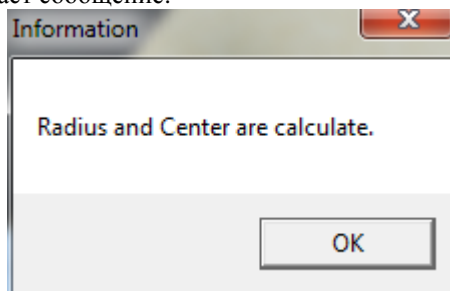
1. () Загружаемые картинки выбираются большого размера для удобства сопоставления с активной областью, поэтому картинка может не поместиться в окне программы, и вы увидите только верхний левый угол (обычно черный). Максимально разверните окно и ползунками переместите край Солнца в видимую область:



2. (🕒) После нажатия появляется окно:



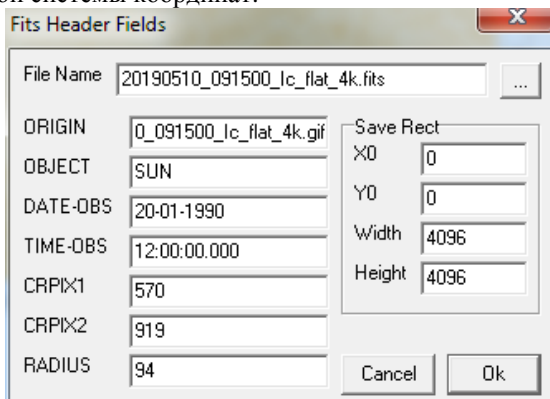
Нажимаете на Ok и выбираете 6 точек более-менее равномерно расположенных по лимбу (сверху, снизу, справа, слева и еще в 2-х местах). Действуйте по методу: ползунками выводите нужный край Солнца на видимое место, устанавливаете точно на край указатель мышки и нажав и держа клавишу Ctrl кликаете мышкой. В месте, где кликнули, появится белая точка (иногда она плохо видна, если место светлое). Далее идите на следующую точку и т.д. После 6-го клика программа выдаст сообщение:



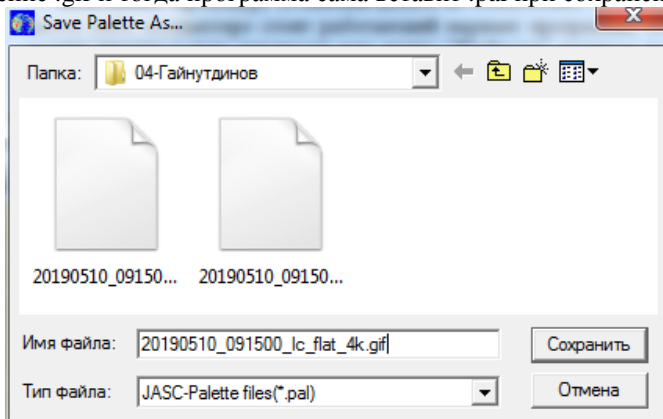
Если сообщение не поступило, значит, либо Вы сделали меньше кликов или не держали нажатой клавишу Ctrl во время клика. Тогда кликайте еще пока не появится сообщение. Потом, если Вы не уверены, что всегда кликали точно на лимбе, то можете повторить эту процедуру сначала.

3. (📁) После нажатия появляется окно (см. ниже), в верхнюю строку которого нужно ввести имя создаваемого fits-файла. Для того чтобы не перепутать файлы удобно задать имя нового fits-файла совпадающим с именем использованного графического файла (его полное имя указано в строке ниже в параметре ORIGIN). Для этого, просто скопируйте эту строку вверх и замените расширение **gif** на **fits** (как на рисунке). После чего нажмите **Ok**. При записи в fits-файл можно записать и время снятия картинки через параметры **DATA-OBS**

и **TIME-OBS**, но это не обязательно и никак не влияет на результаты дальнейшего его использования в программе WorkScan. Остальные параметры изменять нельзя, так как в них записаны параметры установленной системы координат.



4. (📁) При нажатии открывается окно, в котором в параметр **Имя файла** желательно занести имя графического файла (уже сохраненного ранее в буфере при создании fits-файла) с последующей заменой расширения **gif** на **pal** + Сохранить. Можно проще: удалить расширение .gif и тогда программа сама вставит .pal при сохранении.



Использование единого имени файла (но с разными расширениями) позволит не ошибиться в дальнейшем при их использовании.

Подобным образом заранее подготавливаются все картинки, используемые в программе WorkScan.

3.4 Обработка наблюдений в программе WorkScan

Перед началом работы рекомендуется просмотреть **Онлайн help** к WorkScan, который содержит краткие описания всех параметров и команд. В данном параграфе будет представлен их минимальный набор, расположенный в порядке их использования в лабораторной работе, с комментариями, необходимыми для быстрого и качественного ее выполнения.

После инсталляции, при первом обращении к программе нужно провести ее предварительную настройку. Для этого запускаем программу:

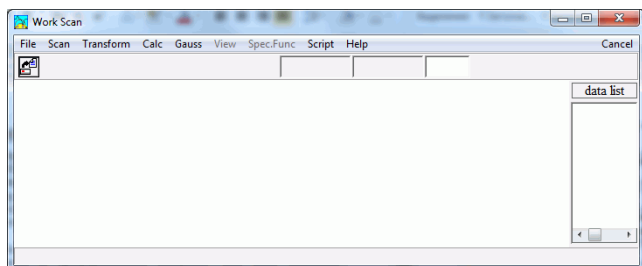


Рис. 3.4.1. Вид программы WorkScan при запуске.

и через пункт меню **File/Set InitDir** открываем окно с набором параметров и изменяем их в произвольном порядке:

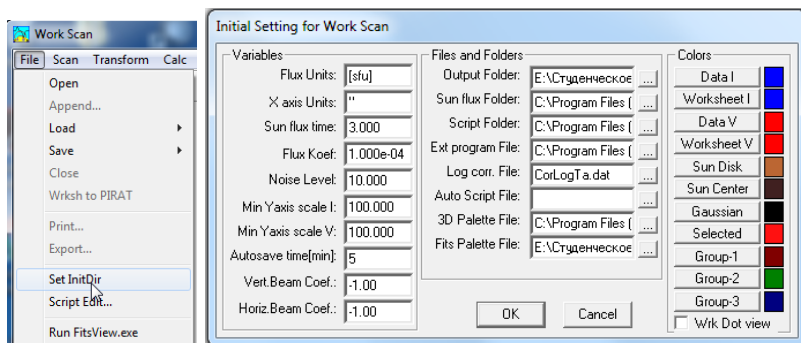


Рис. 3.4.2. Открытие окна начальной установки параметров программы.

Минимально необходимый набор начально устанавливаемых параметров:

| Параметр | Значение параметра | Для чего нужен |
|--------------------|------------------------|---|
| Flux Unit | [sfu] | Вид единиц потока |
| X axis Units | " | Вид единиц расстояния вдоль скана (угловая секунда) |
| Flux Koef | 1.000e-4 | Для отображения потока в единицах sfu – (solar flux unit) |
| Vert.Beam Coef | 1 или | Показывает диаграмму |
| Horiz.Beam Coef | -1 | Не показывает ДН |
| Data I Worksheet I | Синий цвет | Цвет для I и R сканов (желателен) |
| Data V Worksheet V | Красный цвет | Цвет для V и L сканов (желателен) |
| Wrk Dot View | Не отмечен (желателен) | Worksheet – сплошная линия, Data – пунктирная линия. |
| | Отмечен | Worksheet – пунктирная линия, Data – сплошная линия. |


Остальные параметры можно оставить без изменения и изменять их в процессе дальнейшей работы по необходимости.

Порядок работы с программой WorkScan в ходе выполнения лабораторной работы состоит из нескольких укрупненных этапов:

1. Предподготовка РАТАНовского fits-файла к работе (удаление дефектных сканов, коррекция диаграммы, обрезка записей);
2. Центровка сканов (по краям Солнца, по источникам);
3. Калибровка (по спокойной точке? перевод из I,V в R,L, выравнивание уровней R,L);
4. Выделение активной области (определение и удаление фонового уровня в районе активной области);
5. Разбиение активной области на отдельные источники и измерение их параметров (с переносом результатов в отчет);
6. Составление отчета (корректировка за выход из ДН и другие корректы, измерение магнитного поля, наложение выделенных источников на изображения Солнца).

3.4.1 Предподготовка РАТАНовских fits-файлов

Находящиеся в архиве CAO файлы наблюдений вида YYYYMMDD_NHMMSS_AZ_out.fits представляют собой fits подобный набор отсчетов, полученных из разных каналов приемной аппаратуры в период прохождения Солнца через диаграмму направленности телескопа. Сохраненные отсчеты подвергаются некоторой предварительной обработке и позволяют достаточно точно представить примерный вид сканов и качественно, и количественно. Однако для точных измерений этой обработки оказывается недостаточно. Здесь мы опишем некоторые процедуры, упрощающие дальнейшую обработку.

Загрузку fits-файла в программу можно производить двумя способами: через пункт меню **File/Open** или нажимая на иконку :

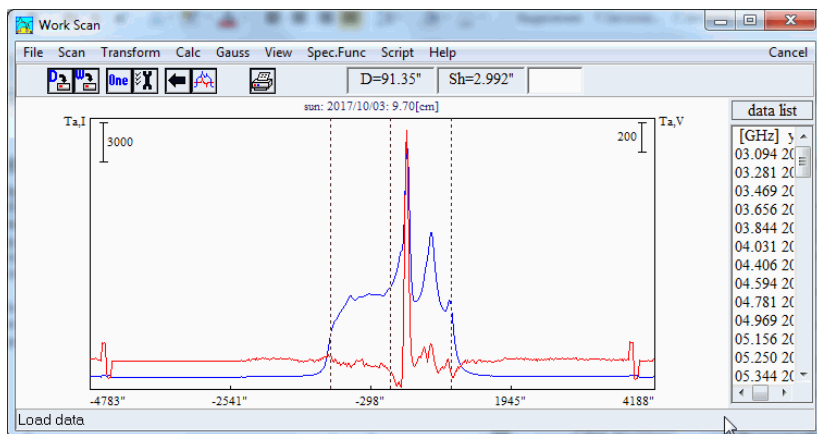



Рис. 3.4.3. Вид программы WorkScan при загрузке fits-файла.

Справа отображается список всех присутствующих частот, а в окне отображается запись на самой длинной из волн (самой маленькой частоте). Щелчок мышкой на какой-нибудь из частот выводит на экран сканы на соответствующей частоте. Прокрутку волн можно также делать, вращая колесико мышки (если предварительно щелкнуть ею в

поле рисунка), или нажимая стрелочки  (правой стрелки не видно, если частота минимальная, а левой если максимальная).

На графике видны две кривые: синяя – интенсивность, красная – круговая поляризация. В данном случае они отмасштабированы на полный размер окна рисунка. Линейные масштабы графиков в антенных температурах обозначены вертикальными черточками слева-вверху (для T_a, I) и справа-вверху (для T_a, V). На концах кривых видны прямоугольные ступеньки - это калибровочные записи. Они не всегда присутствуют в записях и в нашей обработке они не используются.

После загрузки выполняются следующие операции:

1. удаление дефектных частот.

Просматривая записи, последовательно ищем частоты, на которых видны дефекты: сильные искажения записей помехами, рывками, шумами и т.п. (нормальный вид скана представлен на рис. 3.4.3) и эти частоты удаляем через пункт меню **Scan/Delete** (при этом должна быть



включена кнопка, т.е. выполняемое действие относится только к текущей частоте). Однозначно должны быть удалены частоты < 3.0 ГГц (там почти всегда сильные помехи). Также нужно удалить самые высокие частоты, если на них не видно источников (чтобы не мешали).

2. коррекция диаграммы.

При вычислении истинных размеров источников требуется знание размера диаграммы направленности на используемых волнах. Эта величина определяется размерами антенны и ее конструкцией, но вычисляется не точно и должна быть определена по результатам специальных измерений. Ее значения зашиты внутри fits-файла, но эти значения немного отличаются от последних измерений. Их можно исправить загрузкой внутри fits-файла новых значений из внешнего файла следующим образом:



- переключаем кнопку в режим, т.е. менять будем размеры для всех частот;

- выбираем пункт меню **Scan/Correction/Fits Param** и откроется окно для загрузки файла с новыми значениями размеров (файл вида *.cor);

- после загрузки файла появляется окно:

в которое нужно ввести 1. И нажать **Ok**.

3. обрезка записей.

Иногда записи бывают очень длинными и для удобства можно их сократить. Это не сложно:

- выделить мышкой участок кривой, охватывающий все Солнце с хвостами на величину его радиуса справа и слева, и в режиме



сохранить в новом fits-файле.

- загрузить новый fits-файл и в автоматическом режиме отцентрировать по краям (при обрезании центровка нарушается) – меню **Transform/Center Sun + Flag=1**.

Но для экономии времени можно 3-й пункт пропустить.


После выполнения 1-3 или 1-2 операций полезно на всякий случай сохранить на будущее измененный fits-файл. К имени файла полезно добавить слова, указывающие на сделанные операции, т.е. типа:

*_out.fits => *_**out_del_corr**.fits.

3.4.2 Центровка сканов и идентификация источников

В архивных файлах центровка проводится автоматически по краям Солнца. В целом, это получается достаточно неплохо, но если на краю Солнца есть яркий радиоисточник, то он сдвигает видимый край дальше от центра Солнца и центровка нарушается и часто весьма сильно. В результате все радиоисточники на диске Солнца оказываются смещенными в одну сторону относительно связанных с ними оптических источников, причем на одинаковую величину.

Предварительно смещение можно оценить по положению краев по следующей процедуре:

- Кнопкой  открываем окно текущей настройки изображения и ставим галочку у параметра **Center Sun + Ok** (Рис. 3.4.4). Тогда на графике появятся 3 вертикальных линии указывающих на положение краев Солнца и центра Солнца (Рис. 3.4.5).
- Выбираем короткую волну, где активность поменьше, и устанавливаем экранную линейку таким образом, чтобы нижний край линейки проходил через точку пересечения скана в интенсивности (синяя кривая) с вертикальной линией правого края Солнца.
- При этом точки пересечения синей кривой и вертикальной прямой с нижним краем линейки на левой половине Солнца не совпадут. Измерить это расстояние можно с помощью мышки: наведите мышкой на одну точку, нажмите ее левую клавишу и, не отпуская

ее, тяните мышку до второй точки. При движении мышки, в начальной и конечной точке появятся сплошные вертикальные линии, а расстояние между ними будет отображаться в левом нижнем углу картинки (Рис. 3.4.5 DeltaX=14.70"). Половина этого расстояния будет равна смещению центра Солнца (7.35").

Описанный способ измерения любых отрезков вдоль скана с помощью мышки будет применяться и в дальнейшем.

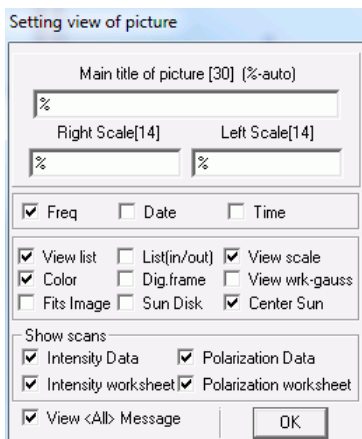


Рис. 3.4.4. Вид окна настройки изображения.

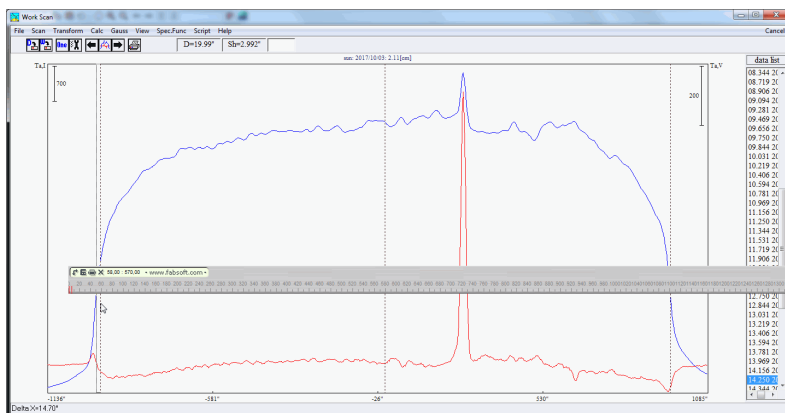
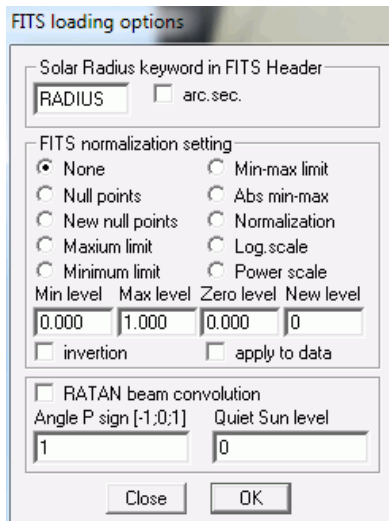


Рис. 3.4.5. Ручное измерение смещения центра скана.

Но основным методом для измерения нарушения центровки (и его исправления) является сопоставление радио сканов с изображениями в “оптике”, подготовленными ранее в виде fits-файлов.

Для этого в окне настроек (Рис. 3.4.4) отмечается параметр **Fits Image**, чтобы загруженный файл был виден. Сам файл загружается через пункт меню **Calc/Fits convolution**. После выбора fits-файла картинка, в открывающемся окне:



как правило, ничего менять не нужно, только нажать **Ok**. Параметры нужно изменять лишь в нестандартных случаях, когда требуется дополнительный поворот картинка, кроме поворота на паралактический угол или нужна нестандартная нормировка яркости.

После такой загрузки картинка уже видна, но для ее правильного отображения требуется еще загрузить палитру, соответствующую загруженному изображению. Загрузка идет через пункт меню **File/Set InitDir**. В открывшемся окне (Рис. 3.4.2) в параметре

Fits Palette File: E:\Студенческое ... нужно указать положение палитры для загруженного рисунка. А для ее изменения надо нажать на кнопку справа и выбрать нужный файл палитры.

Для центровки лучше загружать изображение в белом свете, чтобы были хорошо видны пятна.

Картинка с загруженным изображением имеет приметно такой вид:

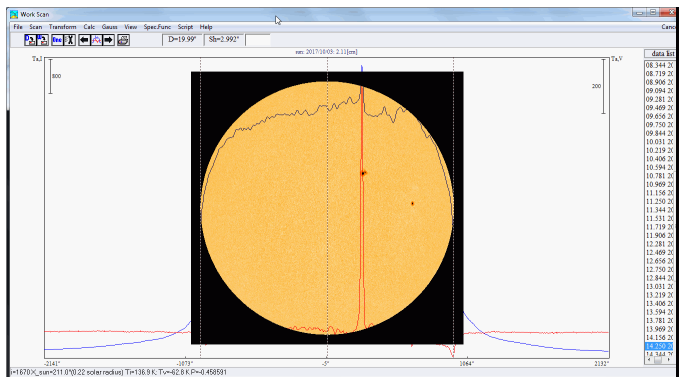


Рис. 3.4.6. Вид РАТАНовского скана с загруженной оптической картинкой.

Видно, что пятно в центре диска приблизительно совпадает с яркой деталью в радиодиапазоне. Но точные измерения в таком масштабе провести сложно – нужно увеличить картинку, путем выделения небольшой области вокруг имеющихся пятен (Рис. 3.4.6а).

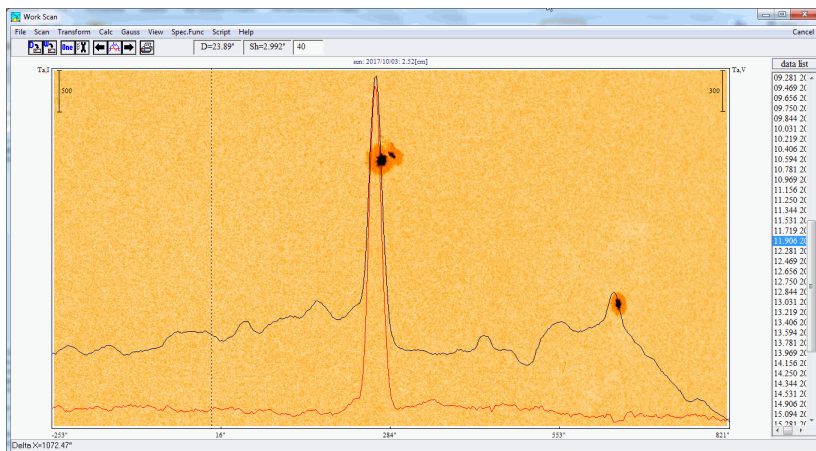
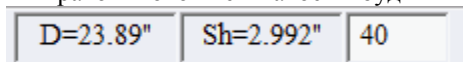


Рис. 3.4.6а. Выделение пятен для выполнения центрирования.

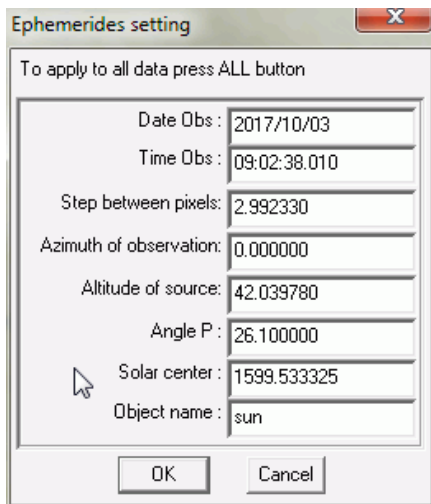
На Рис. 3.4.6а. хорошо видно, что и центральное пятно и пятно расположенное справа смещены относительно максимумов записи в радиодиапазоне. Смещение между центром пятна и максимумом в радиоизлучении можно измерить мышкой, как было описано ранее. Смещение для центрального пятна оказалось равным 10.5", а для правого 9.5", что близко к измерению по краям. Для получения хорошей точности нужно:

- использовать более короткие волны, где источники уже, но еще не слишком маленькие по амплитуде;
- растянуть картинку пошире, но не менее чем до 350" (при большем увеличении программа перестанет отображать картинку);
- при увеличении масштаба картинка расширяется вверх и вниз одинаково, поэтому пятно может выйти за пределы окна. Картинку можно сместить по вертикали набрав цифры на панели инструментов в правом окошке какое-нибудь число (где сейчас стоит 40)




Число выбирается простым подбором, таким, чтобы пятно расположилось близко к максимуму источника (примерно как на Рис. 3.4.6а). Если изменять размеры окна программы или выделяемый интервал по горизонтальной оси, то сдвиг изменится и нужно будет его подбирать снова.

Измеренный сдвиг можно компенсировать, изменив смещение в fits-файле.



Для этого устанавливаем

режим всех сканов –  и открываем через пункт меню **Scan/Correction/Ephemeride** окно в котором изменяем параметр **Solar center** – номер точки, соответствующей центру Солнца, на величину измеренного смещения. Перевод смещения из секунд в точки осуществляется делением на значение параметра **Step between pixels**, (здесь $10''/2.99 \sim 3.3$). И **Ok**.

Результат центрования показан ниже на Рис. 3.4.7. Пространственное совпадение радио и оптических изображений получилось идеальное. Наличие неучтенных ложных смещений надо четко отслеживать во избежание неверной интерпретации результатов наблюдений. Из-за постоянных относительных движений деталей телескопа в архивных наблюдениях РАТАНа неучтенные смещения встречаются достаточно часто, и величина их может быть значительна.

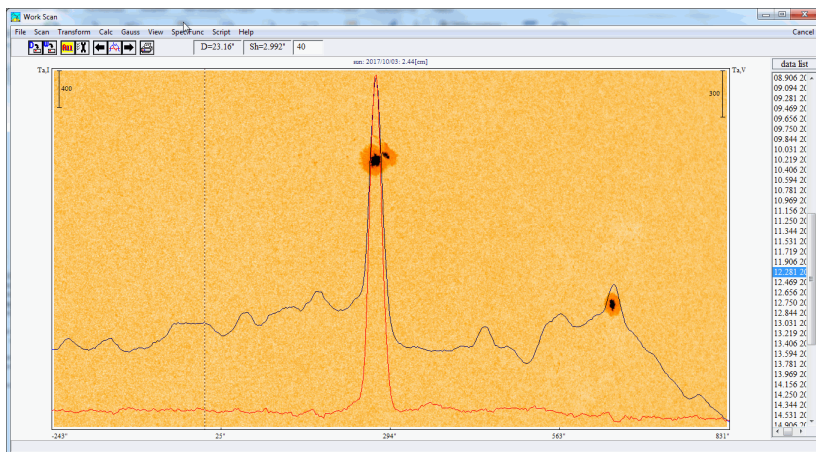




Рис. 3.4.7. Соответствие изображений и РАТАНовских сканов после выполнения процедуры центрования сканов.

Скорректированный fits-файл можно сохранить, добавив в конец имени файла **_shift**. Чтобы при сохранении файла программа не обрезала записи (и тем самым потеряла центровку) необходимо отобразить в окне полный размер записи, нажав . А только потом в режиме  сохранить файл через пункт меню **File/Save/WorkSheet**.

3.4.3 Калибровка и выравнивание уровней

Выполнение калибровки является исключительно важной процедурой при изучении спектров. Для получения идеального спектра требуется обеспечить одинаковое усиление на всех регистрируемых частотах, что технически невозможно осуществить.

Поэтому нужно знать частотную характеристику своей аппаратуры и соответствующим образом корректировать полученные измерения.

Измерение частотной характеристики аппаратуры это отдельная сложная процедура, основанная на измерении спектра какого-либо надежного источника с хорошо изученным, постоянным спектром или с переменным спектром, но с известным законом изменения.

На РАТАН-600 реализовано несколько вариантов проведения калибровки: по генератору шума, по полному потоку от Солнца, получаемому на малых зеркалах в обсерватории Nobeyama, по точке на спокойном участке Солнца, по спокойному Солнцу. Какой из них более точен достоверно неизвестно. Но, говорят, что архивные данные, выполненные с калибровкой по ГШ неплохи.

Поскольку исследование телескопа не входит в план лабораторной работы, то будем пользоваться архивными данными без выполнения дополнительных калибровок.

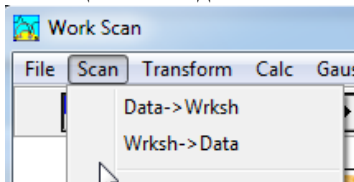
Единственной калибровочной операцией будет выравнивание уровней правой и левой мод. В чем она заключается?

В архивных файлах данные сохраняются в параметрах I и V. Однако исходными сигналами, регистрируемыми аппаратурой является излучение в правой и левой поляризациях, а I и V являются арифметическими комбинациями оцифрованных сигналов.

Поскольку в активных областях значительная часть излучения циклотронная, то естественно проводить обработку в параметрах R-L. А для их совместного анализа требуется, чтобы уровни спокойного Солнца в этих параметрах были одинаковы.

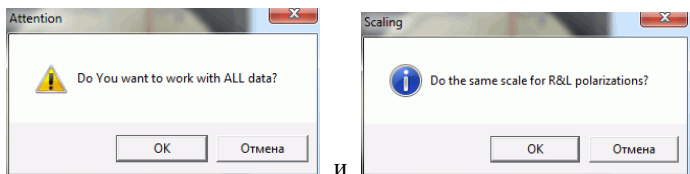
На этом этапе активно используются оба буфера, выделяемых для каждого канала - **Data** и **WorkSheet**. Как они работают?

При загрузке исходного файла каналы I и V загружаются в оба своих буфера Data и WorkSheet (всего 4 буфера). В окне настроек (Рис. 3.4.4, **Show Scans**) они все обозначены. Если у буфера стоит галочка, то он будет виден на графике, а если не стоит, то виден не будет. Данные между буферами **Data** и **WorkSheet** каждого канала могут перемещаться с помощью команд меню:



Все основные операции происходят с данными в буфере **WorkSheet**, а буфер **Data** служит для хранения. Кроме пересылки, единственная операция между ними это вычитание **Scan/Modification/Data--Wrksh**.

1. Процедуру преобразования I-V в R-L и обратно надо выполнять сразу для всех частот. Для конвертации служит команда **Scan/Modification/I,V \Leftrightarrow R,L**. Вначале программа спросит:



и если ответы будут **Ok**, то конвертация произойдет (Рис. 3.4.8). При этом R записывается в **WorkSheet I** канала, а L – в **WorkSheet V** канала. В буферах **Data** остаются I-V.

Здесь в программе есть недоработка: в списке каналов (Рис. 3.4.4, **Show Scans**) всегда написано “интенсивность” и “поляризация”, даже если уже все в R-L. А на графиках на осях написало всегда правильно:

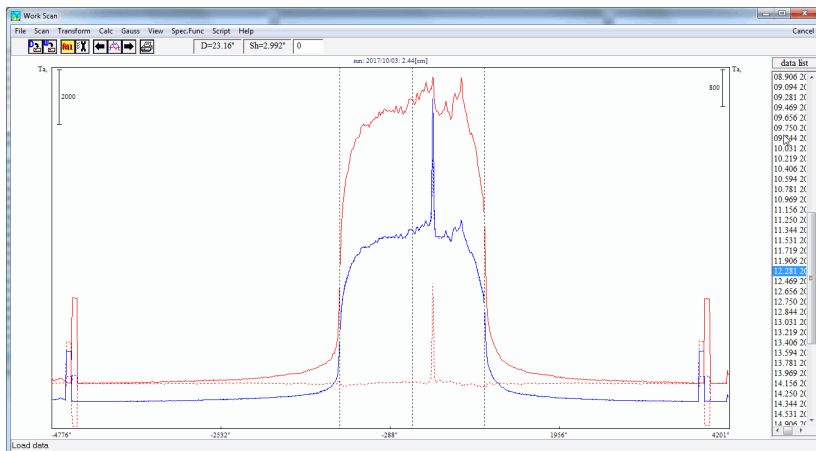
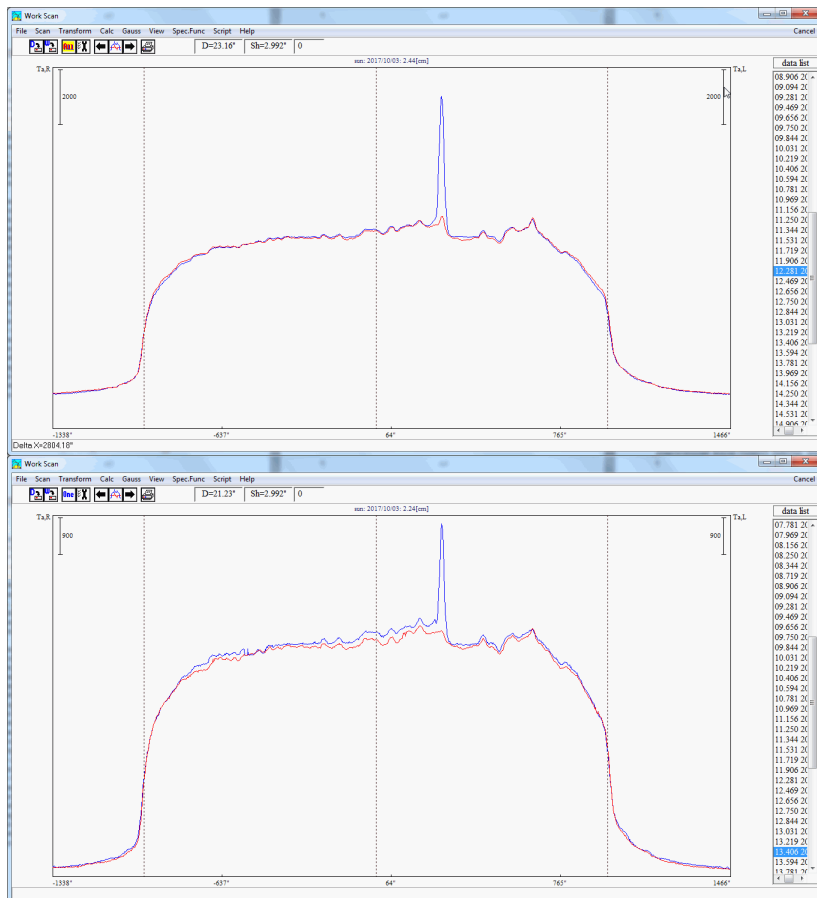


Рис. 3.4.8. Вид сканов после конвертации I,V \Rightarrow R,L.

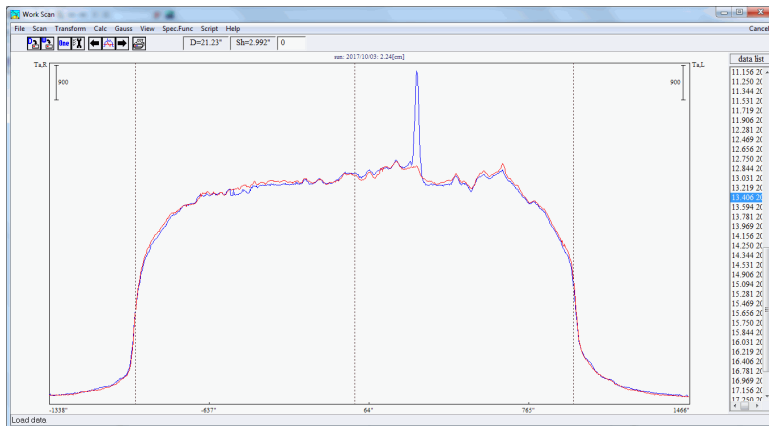
2. Чтобы везде было R-L, копируем WorkSheet в Data, Scan/Wrksh->Data.
3. И устанавливаем одинаковый масштаб для обеих кривых: View/Screen/Equal Scale.



В целом, на основной площади уровни R и L совпадают, за исключением активных областей (рисунок сверху), но на отдельных частотах они могут расходиться и на спокойном Солнце (рисунок внизу). Тогда нужно немного подровнять уровни.

4. Выравнивание уровней (для отдельных волн в режиме):

Нажимаем пункт меню **Scan/Correction/Equal Scale RL** и щелкаем мышкой в месте, где надо совместить уровни R и L
+ копирование в Data командой **Scan/Wrksh->Data**

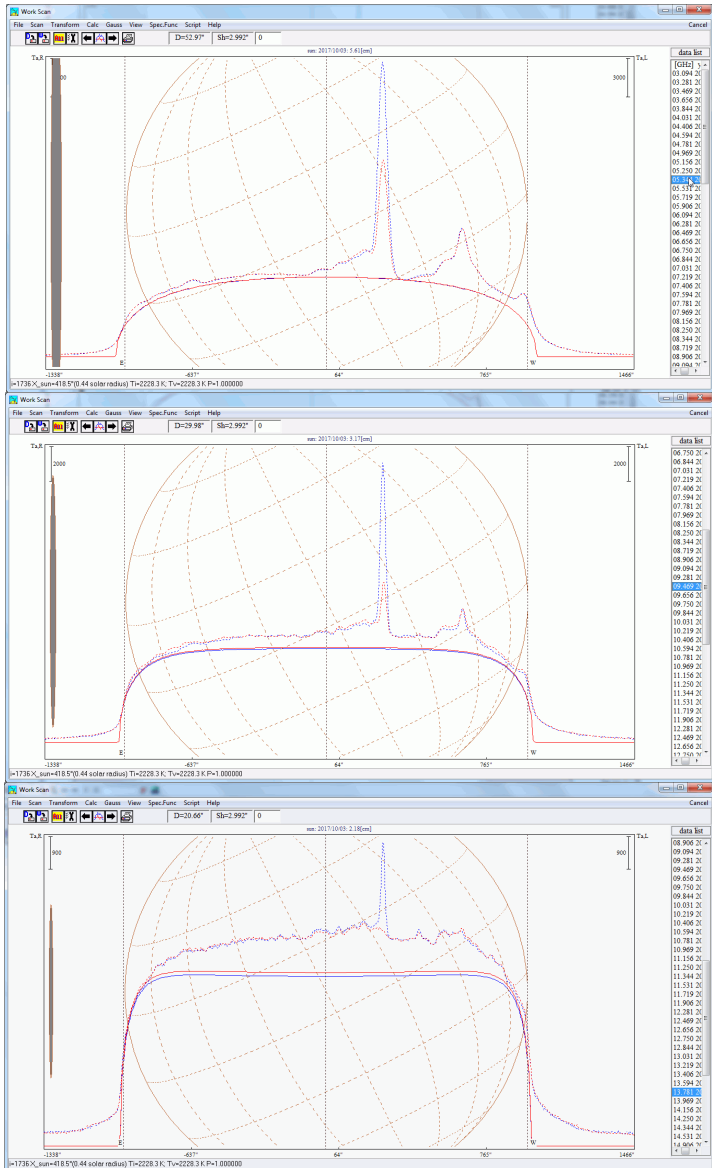


В результате, в окрестности активной области можно добиться улучшения совпадения R и L поляризаций, но не по всей поверхности.

3.4.4 Выделение активной области

Задачей данного этапа является проведение гладкого фонового уровня Солнца и удаление его из записи, с тем, чтобы осталось только излучение активной области. Главная проблема здесь заключается в том, что форма этого уровня неизвестна, в особенности близко к лимбу Солнца.

Один из способов построения модели фона состоит в моделировании излучения Солнца в виде свертки диаграммы направленности радиотелескопа с кругом постоянной или почти постоянной яркости. Результат, представленный на Рис. 3.4.9, получается неоднозначный: на длинных волнах, когда вертикальная диаграмма больше диаметра Солнца, получается очень приличный результат, на волнах, где диаграмма становится меньше диаметра Солнца результат частично приемлим, на волнах, где вертикальная диаграмма меньше радиуса Солнца совпадение плохое, вероятно расчетная диаграмма сильно отличается от реальной.



Второй вариант состоит в построении локального фона в небольшой окрестности около активной области в предположении, что он меняется незначительно и предсказуемым образом (например, линейно).

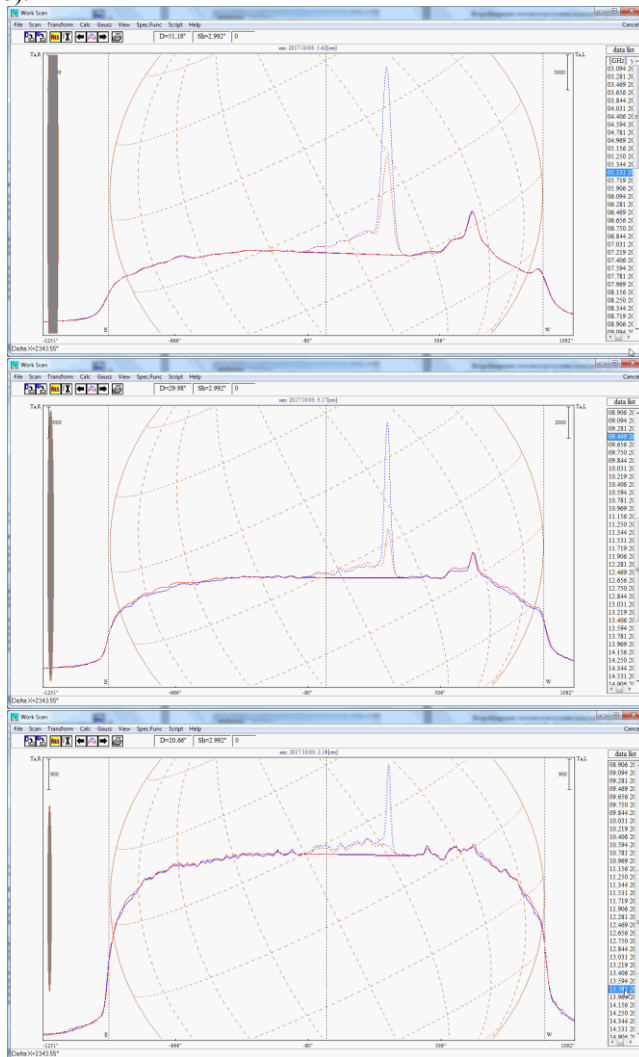


Рис. 3.4.10. Локальная линейная модель фона.

В рассмотренном примере (Рис. 3.4.10) линейная модель неплохо себя показала во всем диапазоне длин волн. Однако нужно учесть, что, рассмотренная группа находится в центральной зоне Солнца и не соприкасается с соседними группами. В противном случае, например у края Солнца проведение прямолинейного фона будет проблематично.

Возможно, в таком случае может помочь комбинированная (глобально-локальная модель), но большого опыта здесь пока нет.

Для выделения активной области после построения модели фона нужно просто вычесть кривые из двух буферов через меню: **Scan/Modification/Data--Wrksh**

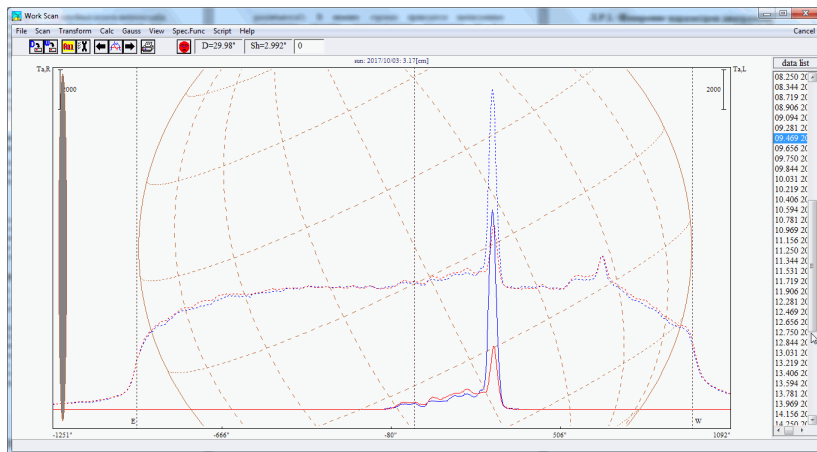


Рис. 3.4.11. Вид выделенной активной области.

В результате в буфере WorkSheet остается только активная область и ее можно разделять на отдельные компоненты.

На этом или еще на предыдущем этапе для сохранности проделанной работы можно еще раз сохранить fits-файл, добавив к старому названию **_RL**. Сохранение (и загрузка) fits-файла в формате R-L в WorkScan также поддерживается.

3.4.5 Разделение активной области на отдельные источники и измерение их параметров (гаусс-анализ)

Как видно из оптических наблюдений (Рис. 2.4.3) и наблюдений в других диапазонах реальные активные области представляют собой сложные образования с тонкой структурой. В настоящее время нет в мире радиотелескопов, которые могли бы исследовать ее во всей полноте в широком частотном диапазоне с достаточным пространственным разрешением. Имеющиеся радиоинтерферометры с большими базами (типа VLA) имеют редкое заполнение u - v плоскости и способны видеть только отдельные яркие мелкомасштабные ($\sim 2''$) детали. Радиогелиографы, у которых много близкорасположенных антенн (типа CCRT и NoRH), дают лучшее заполнение, но имеют умеренное угловое разрешение (10-20"). И общая проблема этих инструментов – это малое число волн, на которых ведутся наблюдения.

В этом ряду ПАТАН-600 обладает уникальными возможностями в области спектральных наблюдений в см диапазоне длин волн при умеренном одномерном пространственном разрешении. Со своими возможностями он одинаково хорош как для наблюдения ярких компактных объектов типа пятен, так и одновременно для крупномасштабных, слабоструктурированных объектов флоккульного типа.

В данной работе к обработке предлагаются именно такие объекты – пятна и гало. Для упрощения задачи студентам предлагаются простые группы с максимально разнесенными объектами: 1-2 разнесенных пятна + гало, смещенное относительно пятен.

Для такого сорта объектов в программе WorkScan имеется соответствующий инструментарий – возможность разбиения источника излучения на несколько деталей - гауссиан (гаусс анализ) с определением их потока, размера и положения, а если деталь не очень узкая, то и яркостной температуры.

Измеренные параметры источников заносятся в специально разработанную форму отчета (экселевский файл, см. далее параграф 3.5), где выполняется дальнейшая обработка, строятся графики и сохраняются другие иллюстративные материалы.

Иллюстрация методики обработки в пособии проводится на “произвольно” выбранном примере активной области NOAA 12683.

1. Отождествление структурных деталей активной области.

Прежде всего необходимо отождествить видимые особенности радиоизображения со структурными деталями в других спектральных областях. Видно (Рис. 3.4.12), что рассматриваемая активная область состоит из двойного пятна и обширной области слабого раздробленного магнитного поля в хвостовой части. С точки зрения обработки область не является идеальной, прежде всего из-за двойного пятна, что может означать присутствие определенных пекулярностей. Тем не менее, в данной работе использовалась именно стандартная обработка, которая должна быть применима, в той или иной степени, к любой активной области. Обработка совсем специфических случаев будет рассмотрена в дальнейшем, во второй части пособия.

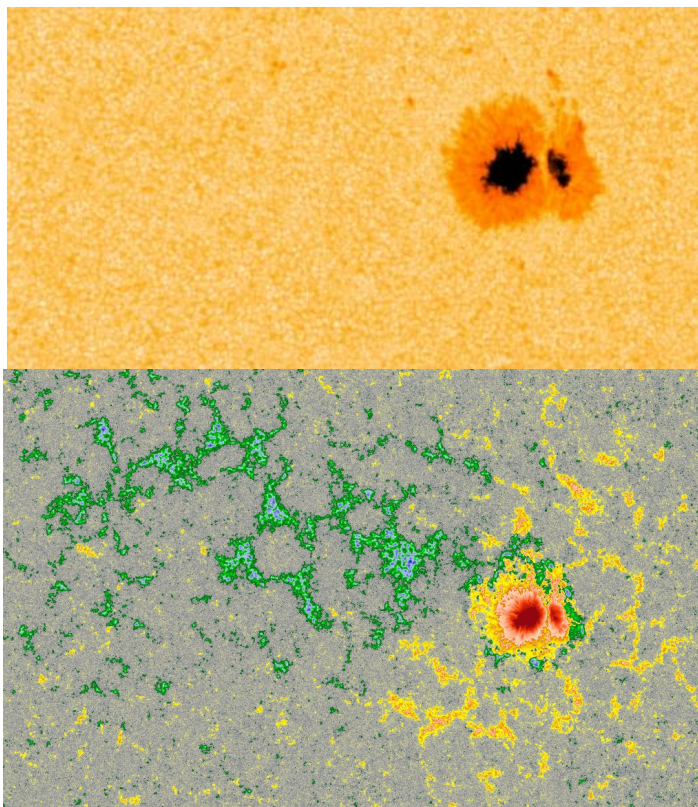


Рис. 3.4.12. Вид рассматриваемой активной области.

Сопоставление распределения магнитного поля с РАТАНовскими сканами (Рис. 3.4.13) показывает, что раздробленность пятна не вызывает видимых искажений записи пятна, а раздробленность магнитного поля хвостовой части отражается в тонкой структуре, но ее анализировать не будем, и будем аппроксимировать одной гауссианой.

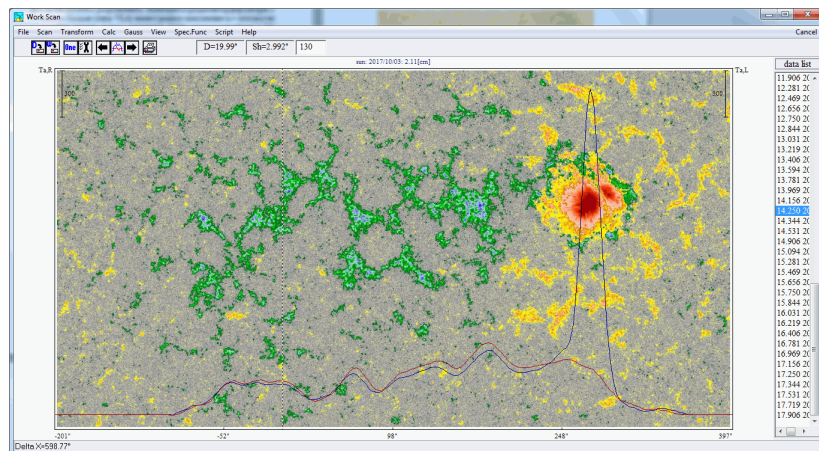



Рис. 3.4.13. Наложение РАТАНовских сканов на карту продольного магнитного поля (цветом показан знак магнитного поля).

2. Инструментарий аппроксимации.

В отличие от предыдущих этапов аппроксимация выполняется отдельно для каждой поляризации. Аппроксимировать можно запись на одной частоте, группе частот или всех частотах сразу. При выполнении аппроксимации после отождествления фоновое изображение рекомендуется скрыть, чтобы лучше видеть кривые.

Начинать аппроксимацию лучше сразу на всех волнах (). Для этого надо выделить только активную область, т.е. не брать пустые участки справа и слева. Выбрать команду меню **Gauss/Gauss Flux** и появится окно (Рис. 3.4.14), в верхней строке которого нужно ввести число вставляемых гауссиан (в данном случае 2) и **Ok**.

Результат аппроксимации представлен на Рис. 3.4.15 (удачный и не удачный варианты).

Input number of gauss :

Number of initial gauss :

☐ spline background

Рис. 3.4.14. Окно ввода параметров аппроксимации.

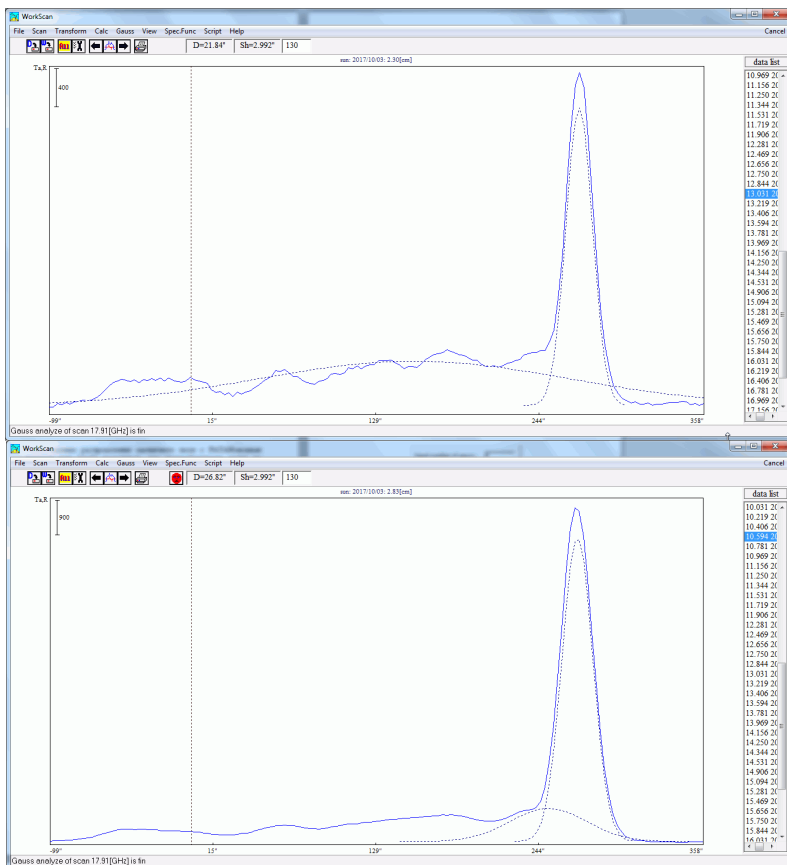


Рис. 3.4.15. Аппроксимация двумя гауссианами.
Сверху: на волне 2.30 см (удачная). Снизу: на волне 2.83 см (неудачная).

Причины возникающих неудач, прежде всего, связаны с механизмом аппроксимации. Алгоритм программы пытается вставить гауссиану в места локальных максимумов. И если первую гауссиану поставить легко (это яркий источник, явно пятно), то куда поместить вторую гауссиану на оставшейся части записи не столь очевидно.

И здесь можно использовать второй вариант аппроксимации – указать алгоритму вручную, куда нужно поставить вторую гауссиану. Для этого в окне ввода параметров (Рис. 3.4.14) кроме 2-х гауссиан в верхней строчке, в средней поставить 1 и **Ok**. Тогда после закрытия окна программа будет ждать, где вы щелкните мышкой. В данном случае щелчок сделан в районе максимума, находящегося левее пятна. Результат (Рис. 3.4.16) оказался весьма успешным. Но результат может быть и неоднозначен, поскольку зависит от места клика мышки. Пересчет по этой методике также можно сделать на одной частоте, группе частот или на всех частотах сразу. Какой вариант 2-0 или 2-1 лучше, априори сказать невозможно – зависит от ситуации, нужно экспериментировать.

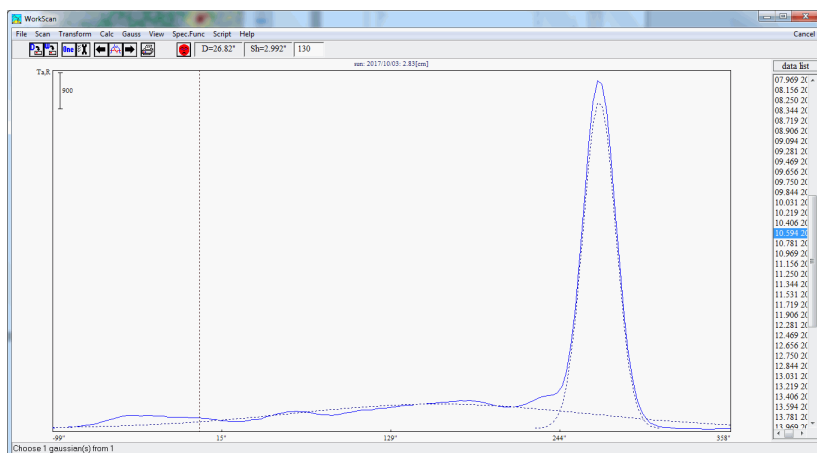
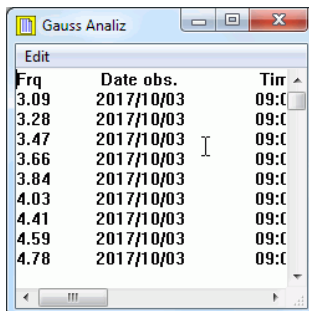


Рис. 3.4.16. Аппроксимация двумя гауссианами с одним указанным местом на “неудачной” волне из Рис. 3.4.15.

В окне ввода параметров (рис. 3.4.14) есть еще параметр – **spline background**. Иногда его использование также позволяет улучшить аппроксимацию. Но насколько часто это бывает, неизвестно.

Замечание:

сразу после аппроксимации появляется окно с результатами аппроксимации (неполными) – его нужно закрыть, чтобы оно не мешало дальнейшим операциям.



| Frq | Date obs. | Time |
|------|------------|------|
| 3.09 | 2017/10/03 | 09:0 |
| 3.28 | 2017/10/03 | 09:0 |
| 3.47 | 2017/10/03 | 09:0 |
| 3.66 | 2017/10/03 | 09:0 |
| 3.84 | 2017/10/03 | 09:0 |
| 4.03 | 2017/10/03 | 09:0 |
| 4.41 | 2017/10/03 | 09:0 |
| 4.59 | 2017/10/03 | 09:0 |
| 4.78 | 2017/10/03 | 09:0 |

Есть еще третий вариант аппроксимации – ручная коррекция гауссиан. Он работает только на одной волне и вызывается командой **Gauss/Interactive Gauss**. По ней открывается окошко (см. Рис. 3.4.17), в котором можно выбирать имеющиеся гауссианы, и вручную менять их параметры (положение, ширина, амплитуда), а также вставлять-удалять гауссианы с целью уменьшить невязку аппроксимации. Данная процедура может быть длительной и сильно неоднозначной.

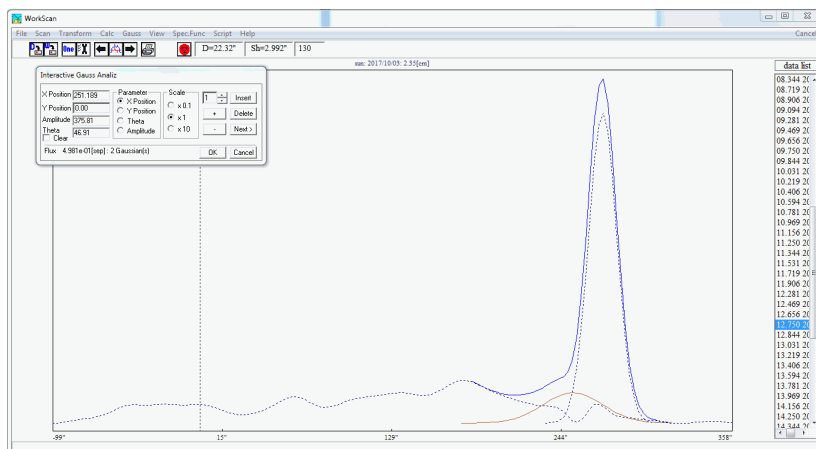


Рис. 3.4.17. Ручная аппроксимация.

Рекомендация!! Выполнение аппроксимаций бывает делом долгим и если нужно будет прервать работу, то чтобы не повторять снова какие-то операции, в программе есть механизм сохранения текущего рабочего состояния программы. Сохраняется и восстанавливается все, кроме fits-файлов картинок. После восстановления рабочего состояния файлы картинок нужно будет снова загрузить.


Сохранение выполняется по команде **File/Save/WorkSpace** в файл с расширением **wsf**, а загрузка - по команде **File/Load/WorkSpace**.

НЕ ЗАБУДЬТЕ!! После завершения аппроксимации в одной поляризации текущее состояние нужно сохранить в файле типа **R.wsf** или **L.wsf** соответственно. Они идут в качестве элементов отчета.

Численные результаты аппроксимации следует извлечь из программы **WorkScan** и переписать их в файл отчета.

Извлекаются данные по команде **Gauss/Local Source Param.**

В результате открывается окно, в котором выписаны все измеренные

параметры гауссиан для всех частот (в режиме .

| Gauss Analyt | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------------|--------------|------|-----|--------------|-----------|-----------------|--------|------------|---------------|-----------|-----------------|--------|------------|--------|
| Freq | Date obs. | Time obs. | Pol. | Num | Fwh[sep]Amp1 | Theta1[°] | Theta_clean1[°] | Tb1[K] | Pss1[°] | Fwh2[sep]Amp2 | Theta2[°] | Theta_clean2[°] | Tb2[K] | Pss2[°] | |
| 3.89 | 2017/10/03 | 09:02:30.010 | I | 2 | 0.31 | 973.68 | 67.94 | 0.00 | 0.0000e+00 | 163.79 | 4.93 | 11579.89 73.87 | 0.00 | 0.0000e+00 | 264.13 |
| 3.28 | 2017/10/03 | 09:02:30.010 | I | 2 | 0.63 | 1364.50 | 88.77 | 21.45 | 1.5456e+06 | 177.33 | 4.79 | 13325.78 65.48 | 0.00 | 0.0000e+00 | 265.25 |
| 3.47 | 2017/10/03 | 09:02:30.010 | I | 2 | 0.58 | 1273.13 | 81.26 | 0.00 | 0.0000e+00 | 169.83 | 5.30 | 13764.77 58.38 | 0.00 | 0.0000e+00 | 265.01 |
| 3.66 | 2017/10/03 | 09:02:30.010 | I | 2 | 0.46 | 1032.37 | 72.61 | 0.00 | 0.0000e+00 | 171.58 | 5.59 | 13941.27 65.85 | 0.00 | 0.0000e+00 | 266.30 |
| 3.84 | 2017/10/03 | 09:02:30.010 | I | 2 | 0.77 | 1254.25 | 93.45 | 57.62 | 1.9188e+05 | 182.45 | 5.94 | 14231.28 63.73 | 0.00 | 0.0000e+00 | 267.35 |
| 4.03 | 2017/10/03 | 09:02:30.010 | I | 2 | 0.91 | 1142.75 | 113.47 | 89.19 | 8.5071e+04 | 195.28 | 6.18 | 14491.20 66.83 | 0.00 | 0.0000e+00 | 268.43 |
| 4.41 | 2017/10/03 | 09:02:30.010 | I | 2 | 2.85 | 1469.59 | 175.34 | 163.17 | 4.8297e+04 | 182.80 | 6.80 | 14633.57 56.90 | 0.00 | 0.0000e+00 | 268.66 |
| 4.59 | 2017/10/03 | 09:02:30.010 | I | 2 | 2.15 | 1469.28 | 174.58 | 163.36 | 4.6682e+04 | 180.71 | 7.15 | 15638.49 54.45 | 0.00 | 0.0000e+00 | 268.58 |
| 4.78 | 2017/10/03 | 09:02:30.010 | I | 2 | 1.40 | 1399.95 | 112.92 | 96.16 | 8.8042e+04 | 172.51 | 7.62 | 16242.38 52.97 | 0.00 | 0.0000e+00 | 268.71 |

Содержимое этого окна следует выделить руками (Ctrl+A не работает) и скопировать в блокнот, заменить все точки на запятые и скопировать в отчет на страничку **R-buffer** или **L-buffer**, смотря какая поляризация обрабатывалась.

На этом этапе можно изготовить рисунки с аппроксимацией источников, наложенные на изображения Солнца в белом свете или магнитного поля (аппроксимация в одной поляризации на один фон, аппроксимация в другой поляризации на другой фон) – см. подробности в параграфе 3.5). Но лучше это делать в конце работы, после заполнения отчета и последующих корректировок аппроксимаций, используя данные в новых **R.wsf**, **L.wsf**.

После того, как выполнены все операции для одной поляризации, переходите к другой поляризации и выполните те же действия.

3.5 Форма отчетности по лабораторной работе

Для ускорения работы и стандартизации отчетных материалов был разработан экселевский файл отчета, аккумулирующий результаты работы и помогающий в выполнении дополнительной обработки данных, полученных в результате гаусс-анализа.

Заполненный файл отчета представляется преподавателю в электронном виде.

Шаблон имени файла: **NN_Фамилия_RATAN-file.xls**

NN – номер студента (назначает преподаватель)

Фамилия – фамилия студента,

RATAN-file – полное имя обрабатываемого файла.

Дополнительно представляются следующие электронные материалы:

1. рабочие файлы с выполненными аппроксимациями для обеих поляризаций (**R.wsf** и **L.wsf**).

2. созданные в начале fits-файлы изображений Солнца с соответствующими палитрами.

3. модифицированные fits-файлы РАТАНа, сохраненные на этапе предподготовки.

В файле отчета используются 4 поименованные страницы, требующие заполнения:

I. Вкладки R-buffer и L-buffer – идентичные страницы для правой и левой поляризации в которые копируются результаты гаусс-анализа активной области:

| | | | | | | Flux | | Record | Width | Tb | Pos | Flux | | Record | Width | Tb | Pos |
|----|---------------------------|------------|----------|------|-----|-----------|---------|-----------|------------------|----------|-----------|------|-----------|------------------|---------|----------|--------|
| 7 | Правая поляризация | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Freq | Date obs. | Time obs | Pol. | Num | Flx1[sep] | Amp1 | Theta1[°] | Theta_cle1Tb1[K] | Pos1[°] | Flx2[sep] | Amp2 | Theta2[°] | Theta_cle2Tb2[K] | Pos2[°] | | |
| 9 | 3.09 | 2019/04/14 | 14:01.9 | | 2 | 3 | 4769.76 | 133.4 | 105.96 | 3.40E+05 | 189.26 | 5.1 | 13657.51 | 79.86 | 0 | 0.00E+00 | 263.03 |
| 10 | 3.28 | 2019/04/14 | 14:01.9 | | 2 | 2.73 | 4675.89 | 113.01 | 83.28 | 4.48E+05 | 187.06 | 6.07 | 15823.21 | 74.19 | 0 | 0.00E+00 | 263.74 |
| 11 | 3.47 | 2019/04/14 | 14:01.9 | | 2 | 2.7 | 4200.7 | 113.01 | 87 | 3.62E+05 | 187.06 | 6.45 | 15749.22 | 72.78 | 9.64 | 7.05E+07 | 264.02 |
| 12 | 3.66 | 2019/04/14 | 14:01.9 | | 2 | 3.63 | 4326.18 | 136.52 | 118.13 | 2.38E+05 | 194.76 | 6.24 | 14559.2 | 70.18 | 15.55 | 2.36E+07 | 266.02 |
| 13 | 3.84 | 2019/04/14 | 14:01.9 | | 2 | 2.74 | 3546.05 | 117.93 | 98.31 | 2.34E+05 | 187.06 | 6.95 | 15439.3 | 68.72 | 21.92 | 1.20E+07 | 265.65 |
| 14 | 4.03 | 2019/04/14 | 14:01.9 | | 2 | 3.81 | 3884.52 | 139.79 | 125.24 | 1.82E+05 | 194.47 | 7.05 | 15606.29 | 64.45 | 17.28 | 1.77E+07 | 266.4 |
| 15 | 4.41 | 2019/04/14 | 14:01.9 | | 2 | 2.87 | 2946.72 | 122.84 | 108.87 | 1.52E+05 | 187.06 | 7.77 | 16010.48 | 61.16 | 22.41 | 9.72E+06 | 266.35 |
| 16 | 4.59 | 2019/04/14 | 14:01.9 | | 2 | 3.1 | 3065.14 | 122.84 | 110.07 | 1.48E+05 | 187.06 | 8.37 | 17025.2 | 58.55 | 21.3 | 1.07E+07 | 266.58 |

1-7 строки страницы: дополнительная информация.

8 строка и ниже: полная копия выдачи Workscan'a. Часть из этих параметров связана с параметрами во вкладке **Spot**.

8 строка – имена параметров в Workscan.


5 строка – названия этих же параметров во вкладке **Spot**.

Желтые столбцы таблицы – параметры, относящиеся к левому источнику (к ГАЛО).

Зеленые столбцы таблицы – параметры, относящиеся к правому источнику (ПЯТНО).

Красные столбцы – в анализе не используются.

II. Вкладка Spot – содержит таблицу параметров аппроксимации и их корректировки, а также результаты дополнительных расчетов.

| | | | | |
|---|---|--|-------------------|---------|
| 1 | ФИО : Пирогов Михаил Александрович | Группа : | 491 | 2019 г. |
| 2 |  | | | |
| 3 | Наблюдения | 14.04.19 | Группа NOAA 12738 | |
| 4 | | | | |
| 5 | Имя файла (ПАТН) : | *20190414_121401_sam+0_csd-RL-cc-shiff | | |

ФИО,
Дата наблюдения,
Имя РАТАНовского файла,
Номер активной области,
Номер студенческой группы,
Год выполнения задания.

Левая таблица

| | | Поляризация | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|-------------|------|-----|-------|-----|-----|----------|----------|-----|----|
| Freq (GHz) | Wave (cm) | Flux, [sfu] | | | F*w*w | | | Tb, [K] | | | Ha |
| | | Halo | Sp1 | Sp2 | Halo | Sp1 | Sp2 | Halo | Sp1 | Sp2 | |
| 3,09 | 9,71 | 3 | 5,1 | | 282,8 | 481 | | 3,40E+05 | 0,00E+00 | | 13 |
| 3,28 | 9,15 | 2,73 | 6,07 | | 228,4 | 508 | | 4,46E+05 | 0,00E+00 | | 1 |
| 3,47 | 8,65 | 2,7 | 6,45 | | 201,8 | 482 | | 3,62E+05 | 7,05E+07 | | 1 |
| 3,66 | 8,20 | 3,63 | 6,24 | | 243,9 | 419 | | 2,38E+05 | 2,36E+07 | | 13 |
| 3,84 | 7,94 | 2,74 | 6,95 | | 167,2 | 424 | | 2,34E+05 | 1,20E+07 | | 13 |

Данные гаусс-анализа в таблицу передаются автоматически из буферных страниц **R-buffer** и **L-buffer** (в левой части таблицы – для правой поляризации, в правой части таблицы – для левой)

Длина волны рассчитывается из частоты по формуле: $Wave = 30 / Freq.$

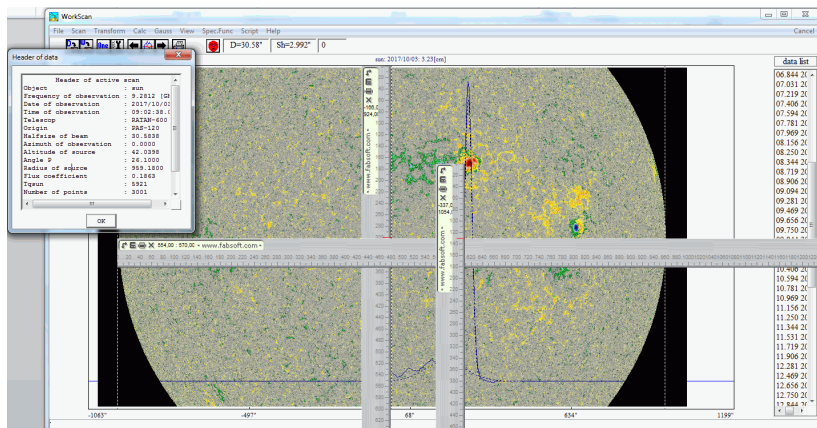
Средняя таблица:

| h ['] = | Коррекция за смещение источника по высоте (выход из диаграммы) | | | | | | | | | | | |
|---------|--|----------|-----|-------------|----------|-----|-----------------|------|-----|-----------------|------|-----|
| | Tb, [K] - R | | | Tb, [K] - L | | | Flux, [sfu] - R | | | Flux, [sfu] - L | | |
| 1,32 | | | | | | | | | | | | |
| F-diag | Halo | Sp1 | Sp2 | Halo | Sp1 | Sp2 | Halo | Sp1 | Sp2 | Halo | Sp1 | Sp2 |
| 0.99909 | 3.41E+05 | 0.00E+00 | | 1.58E+05 | 1.30E+06 | | 3.00 | 5.10 | | 2.31 | 5.33 | |
| 0.99897 | 4.47E+05 | 0.00E+00 | | 2.93E+05 | 0.00E+00 | | 2.73 | 6.08 | | 3.40 | 4.29 | |
| 0.99885 | 3.62E+05 | 7.06E+07 | | 1.86E+05 | 2.26E+06 | | 2.70 | 6.46 | | 3.15 | 5.41 | |
| 0.99872 | 2.38E+05 | 2.36E+07 | | 2.09E+05 | 0.00E+00 | | 3.63 | 6.25 | | 3.47 | 4.53 | |
| 0.99859 | 2.35E+05 | 1.20E+07 | | 1.79E+05 | 5.98E+06 | | 2.74 | 6.96 | | 3.33 | 4.88 | |
| 0.99845 | 1.83E+05 | 1.78E+07 | | 1.66E+05 | 0.00E+00 | | 3.82 | 7.07 | | 3.73 | 4.88 | |

В таблице представлены данные, скорректированные за выход источника из вертикальной диаграммы. Коррекция производится исходя из размера диаграммы на соответствующей волне и смещения источника вверх-вниз от горизонтальной линии в угловых минутах (число в зеленой ячейке).

Для простого расчета предлагается использовать измерение смещения пятна по картинке магнитного поля (или в белом свете) уже загрязненной в программу Workscan при проведении измерений.

Увеличиваем изображение Солнца на максимум, но так что видны его края справа и слева. На центральной вертикальной линейке отмечаем центральную точку и через нее кладем верхний край горизонтальной линейки и от нее правой вертикальной линейкой отмечаем смещение пятна в пикселях. По горизонтальной линейке измеряем диаметр Солнца в пикселях. А радиус Солнца в угловых секундах можно получить из заголовка РАТАНОВСкого фитс-файла по команде **View/Scan Header** из появляющегося окна (параметр **Radius of source**):



Графики:

К представленным на вкладке **Spot** таблицам прикреплены графики соответствующих параметров (Рис. 3.4.17-3.4.17). **При сдаче работы студенты должны дать свое объяснение особенностям поведения представленных на всех графиках кривых.**

Если имеются большие дефекты на кривых (Рис. 3.4.17), студенты должны пересчитать результаты на соответствующих волнах.

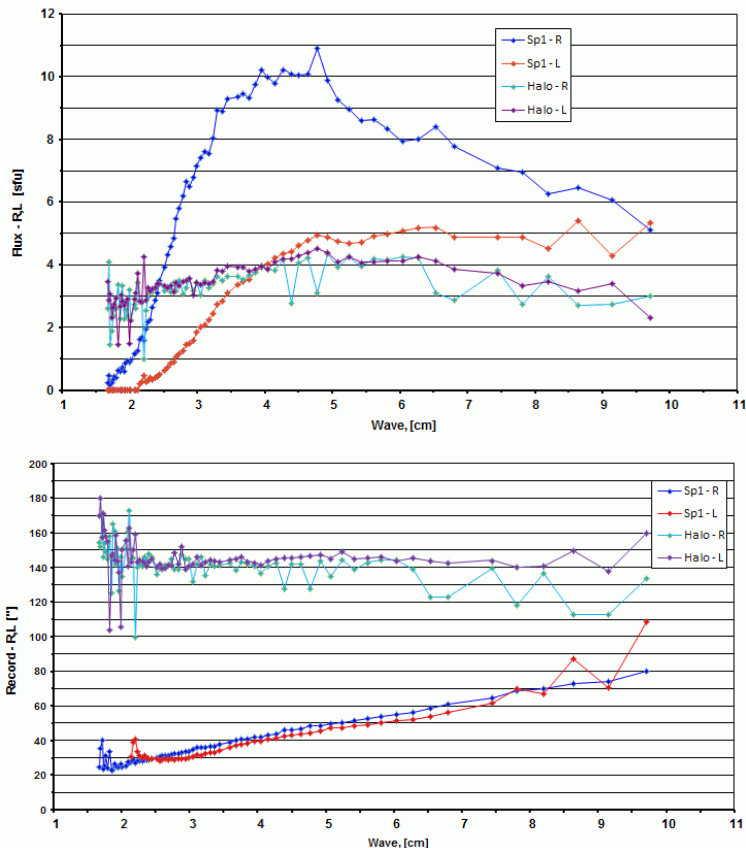


Рис. 3.4.17. Спектры потока (параметр **Flux** в таблице) и размеров записи источников (параметр **Record**) в обеих поляризациях.

В большинстве случаев причиной возникновения дефектов является “плохая” аппроксимация гауссианами, вызванная их близким расположением, так что на записи не видно ярко выраженных, хорошо отделенных максимумов. Особенно это проявляется в длинноволновой области, где за счет более широкой диаграммы направленности запись сильно сглаживается.

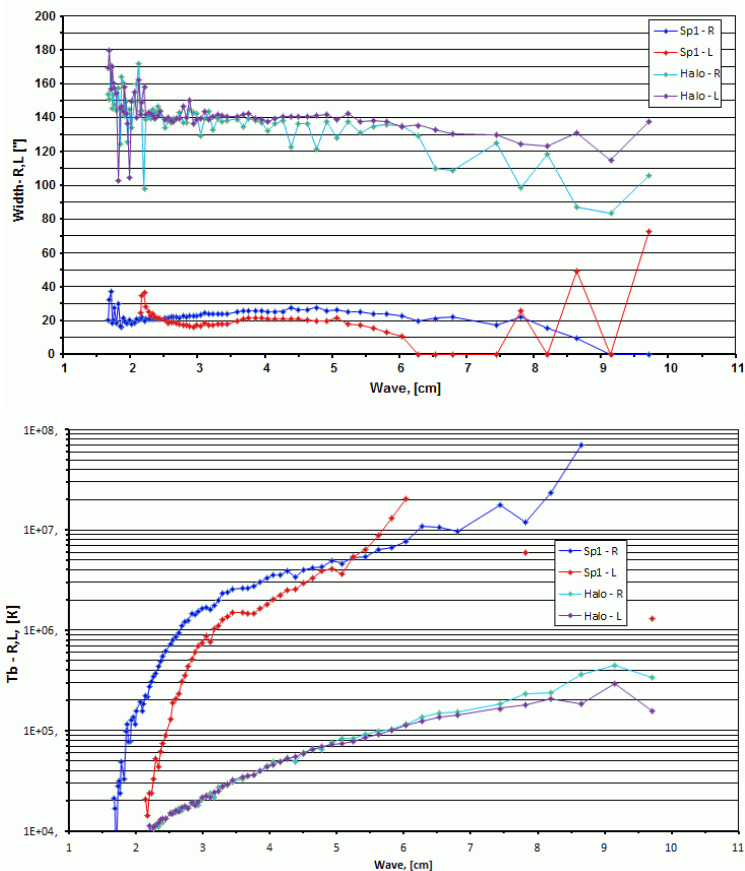


Рис. 3.4.18. Спектры истинных размеров источников (с учетом уширения записи диаграммой направленности, параметр **Width**) и яркостной температуры (параметр **Tb**) в обеих поляризациях.

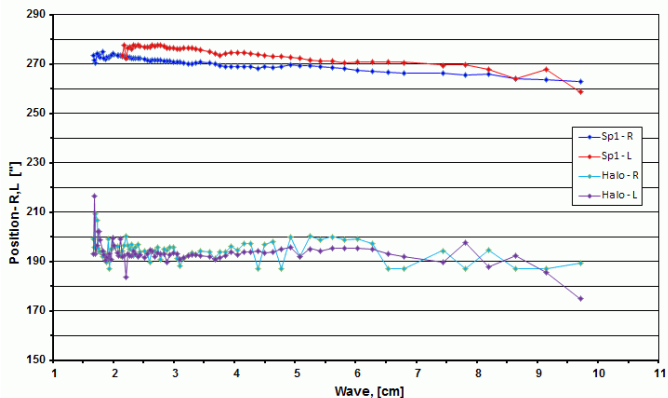


Рис. 3.4.19. Зависимость положения источников (параметр Pos) от длины волны.

Для сравнения с оптикой студенты еще должны измерить с помощью мышки размеры пятна (тень и полутень) и положение его центра и записать их в конце первой таблицы.

Измерение магнитного поля пятна.

Исходя из предположения о циклотронном характере излучения пятна студенты должны измерить максимальную величину магнитного поля в пятне путем построения экстраполяции зависимости потока от длины волны (Рис. 3.4.20) в сторону коротких волн.

Для этого, нужно из полной кривой потока (Рис. 3.4.17) выделить коротковолновый линейный участок, средствами EXCEL построить линейную аппроксимацию и найти волну, на которой поток становится равным 0, т.е. исчезает циклотронное излучение. В предположении, что наблюдаемое излучение в обыкновенной волне генерируется на 2-й гармонике, а необыкновенное на 3-й, по нижеследующим формулам находится значение магнитного поля.

| | | | |
|---|-------------------|---------------|---------------|
| Bo (гс) = $5400 / \lambda_2$ (см) | | Sp1_R | Sp1_L |
| | Wave, cm = | 1,90 | 2,297 |
| Be (гс) = $3570 / \lambda_3$ (см) | B, [Gs] = | 1877,96 | 2350,9 |
| | | E-mode | O-mode |

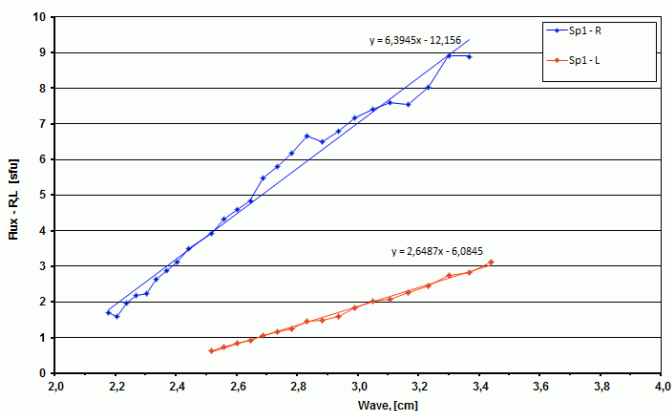
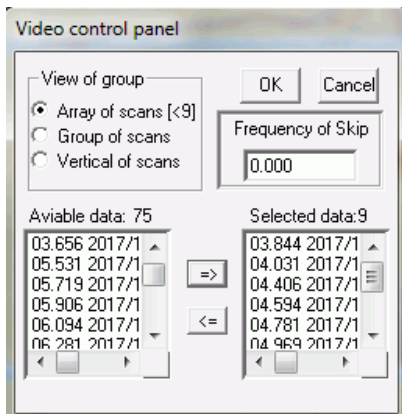


Рис. 3.4.20. Зависимость потока от длины волны на коротких волнах.

Аналогичные расчеты можно провести и по измерениям яркостных температур (Рис. 3.4.18). Однако точность измерения по потокам выше, т.к. поток величина интегральная, а на яркостную температуру сильно влияет неточности измерения размеров источника.

III. Вкладка **Picture**

Последняя оставшаяся операция состоит в изготовлении картинок, отображающих качество выполненных аппроксимаций:



Для этого через пункт меню **View/Scan Group/Scan Group** открывается окно выбора частот, выбирается группа из 9 соседних частот и отображается плиточкой 3 на 3 (Рис. 3.4.21). Затем экран программы копируется в буфер клавишей компьютера **Print Scrn** или любым другим удобным для студента способом и далее копируется на вкладку **Picture**. Затем выбираются следующие 9 частот и т.д. до конца списка.

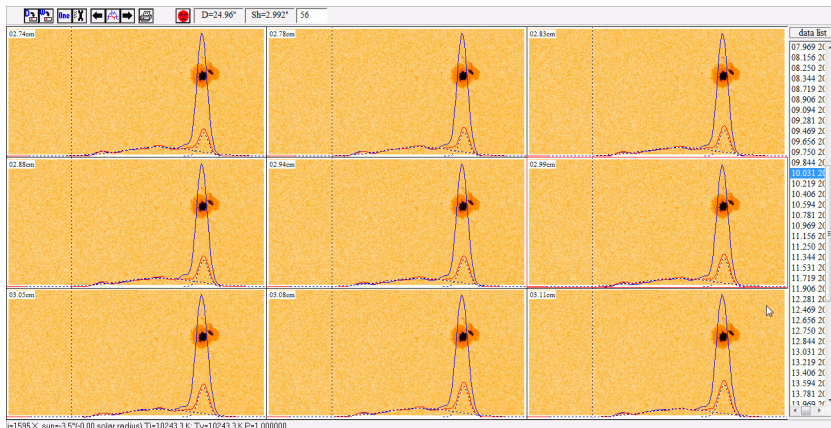


Рис. 3.4.21. Отображение аппроксимации активной области для отчета.

После изготовления рисунков для одной поляризации, нужно загрузить в Workscan, сохраненный ранее Workspace (*.wsf) с другой поляризацией и другим рисунком, и повторить операцию.

При выполнении этой операции для получения результата нужного качества надо ориентироваться на следующие правила:

1. на всех рисунках должны быть показаны обе поляризации вне зависимости от того, какая поляризация аппроксимируется;
2. по первому рисунку надо подобрать вертикальное смещение Солнца, такое, чтобы пятно не сильно перекрывало кривые;
3. угловой размер рисунка должен быть минимальным (максимально крупным), но при этом должны быть видны вся активная область на обеих картинках (Рис. 3.4.11) и по горизонтали и по вертикали. Но при размере менее 350" картинка отображаться не будет.
4. угловой размер рисунка в обеих поляризациях должен быть примерно одинаков.
5. начинать выбор надо с высоких частот, продвигаясь к низким;
6. снимки складывать на странице Picture в два столбика по поляризациям в порядке убывания частот (увеличения длин волн);
7. снимки должны быть одинакового размера;
8. для контроля: длины волн на рисунках в одной строке должны быть одинаковые. В противном случае какие-то частоты были пропущены.

Литература

- Гельфрейх Г.Б., Лубышев Б.И. О структуре локальных источников S-компоненты радиоизлучения Солнца // *Астрономический журнал*. 1979, Т. 56, Вып. 3, с. 562–573.
- Злотник Е.Я. К теории медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения. I // *Астрономический журнал*. 1968, Т. 45, Вып. 2, с. 310–320.
- Железняков В.В. Излучение в астрофизической плазме. М., Янус-К, 1997.
- Коржавин А.Н., Опейкина Л.В., Петерова Н.Г. Переходная область над солнечными пятнами по наблюдениям на микроволнах // *Астрофизический бюллетень*. 2010, Т. 65, № 1, с. 63–77.
- Краус Д.Д. Радиоастрономия. М.: Советское радио. 1973.
- Крюгер А., Солнечная радиоастрономия и радиофизика. М., Мир, 1984.
- Опейкина Л.В. и др. К вопросу об оценке плотности потока источников солнечного радиоизлучения // *Астрофизический бюллетень*. 2015, Т. 70, № 3, с. 394–402.
- Опейкина Л.В. и др. Определение координат источников радиоизлучения на Солнце по наблюдениям на РАТАН-600 в Многоазимутальном режиме // *Астрофизический бюллетень*. 2020, Т. 75, №3, с. 396–406.
- Петерова Н.Г., Топчило Н.А. Эффект Гельфрейха-Лубышева по наблюдениям солнечных пятен на микроволнах // *Астрофизический бюллетень*. 2016. Т. 71, №2, с. 251–260.
- Топчило Н.А., Петерова Н.Г., Борисевич Т.П. Корона над крупным одиночным пятном по наблюдениям в R и L-поляризации на микроволнах // *Астрономический журнал*. 2010, Т. 87, №1, с.75-92.
- Хайкин С.Э. и др. [Радиотелескоп РАТАН-600 // Известия ГАО](#). 1972. N188, 3-11 и другие статьи этого "Ратановского" номера.
- Христиансен У., Хёгбом И. Радиотелескопы. М.: Мир. 1988.
- Aschwanden M.J. Physics of the Solar Corona, Praxis Publ. Ltd, Chichester, UK, 2005.
- Aschwanden M.J.. New Millennium Solar Physics. Springer Nature, Switzerland AG, 2019.
- Gary D.E. and Keller C.U. Solar and Space Weather Radiophysics. Springer Science + Business Media, Inc. 2005.
- Fleishman G.D., Toptygin I.N. Cosmic Electrodynamics. Springer Science+Business Media New York. 2013.

Учебное издание

Николай Андреевич Топчило

ОБРАБОТКА СОЛНЕЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

Учебное пособие